



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## CHLADÍCÍ SYSTÉM FORMULE STUDENT

FORMULA STUDENT COOLING SYSTEM

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kamil Šebela

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

BRNO 2019

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Bc. Kamil Šebela</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Michal Janoušek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Chladicí systém Formule Student**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Navrhněte měřicí systém za účelem ověření parametrů aktuálně používaného chladicího systému vozidla Formule Student. Naměřené parametry zpracujte a navrhněte úpravy chladicího systému za účelem zlepšení jeho účinnosti.

#### **Cíle diplomové práce:**

Popište chladicí systém používaný ve voze Formula Student.

Sestavte měřicí řetězec pro stanovení parametrů chladicího systému.

Zpracujte naměřená data.

Navrhněte konstrukční řešení pro zlepšení parametrů chladicího systému.

#### **Seznam doporučené literatury:**

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily III: Motory. 4. přepracované. Brno: Avid, 2007. ISBN 978-80-903671-7-3.

2017-18 Formula SAE Rules. September 2, 2016. Michigan: SAE International, 2016, 175 s. Rev A.

Dostupné také z: <http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>

Formula Student Germany All FSAE Teams. Formula Student Germany [online]. 2016 [cit. 2016-0-29]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.de/fsc/>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá chladícím systémem Formule Student. Práce je rozdělena do tří částí, první část se zabývá popisem stávajícího chladícího a mazacího systému. Druhá část práce se věnuje měřením jednotlivých komponent systému na měřicím stavu, v aerodynamickém tunelu a měření na vozidle. Poslední část práce se věnuje zhodnocení měření a návrhu konstrukčních úprav pro zlepšení parametrů chladícího systému.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Formula Student, chladí systém, měření vodního čerpadla, aerodynamický tunel, měření na voze

## ABSTRACT

The thesis deals with Formula Student cooling system. The thesis is divided to three main parts, the first part deal about description of current cooling system and lubricating system. The second part of thesis deals with measuring individual component of system at measuring stand, wind tunnel and measuring at vehicle. The last part of thesis deal about evaluation of measurement and construction changes for improving parameters of the cooling system.

## KEYWORDS

Formula Student, cooling system, measuring water pump, wind tunnel, measuring at vehicle



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠEBELA, Kamil. Chladicí systém Formule Student. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116445>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michal Janoušek.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Janouška, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2019

.....

Kamil Šebela



## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Michal Janoušek Ph.D. za vstřícný přístup a odborné rady při zpracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat za možnost realizace práce týmu TU Brno Racing a partnerům týmu za podporu při provádění měření a odborné rady.

Zvláštní dík patří rodině za podporu po celou dobu studia.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Formule student .....	11
1.1 TU Brno Racing .....	11
1.2 Pravidla podle Formula Student Germany .....	12
1.2.1 Pravidla pro chladicí a mazací systém .....	12
2 Chladicí systém Dragona 8 .....	14
2.1 Části chladicího systému .....	14
2.1.1 Výměník voda-vzduch .....	14
2.1.2 Oběžné čerpadlo .....	15
2.1.3 Ventilátor a jeho uchycení .....	16
2.1.4 Expanzní nádoba s regulací tlaku .....	16
2.1.5 Rozvodné trubky a spoje trubek .....	17
2.1.6 Okruh chlazení turbodmychadla .....	17
2.2 Mazací systém .....	18
2.3 Záznam z Dragona 7 a 8 .....	18
2.3.1 Provozní data .....	19
3 Analýza chladicího a mazacího systému .....	21
3.1 Měření charakteristiky čerpadla chladicí kapaliny .....	21
3.1.1 Popis měřicího řetězce .....	21
3.1.2 Postup měření .....	25
3.1.3 Charakteristiky čerpadel .....	26
3.1.4 Měření průtoku chladiči .....	29
3.2 Měření charakteristiky olejového čerpadla .....	31
3.2.1 Popis měřicího řetězce .....	31
3.2.2 Charakteristika olejového čerpadla .....	33
3.2.3 Měření průtoku přes chladiče .....	33
3.3 Měření průtoku vzduchu přes chladič .....	35
3.3.1 Měřicí vrtule .....	35
3.3.2 Měření ve větrném tunelu .....	36
3.3.3 Výsledky měření průtoku vzduchu .....	37
3.3.4 Měření tlaku před a za chladičem .....	39
3.4 Charakteristiky chladičů .....	41
3.5 Měření na voze .....	44
3.5.1 Měřené veličiny .....	44
3.5.2 Měření teploty oleje a vody .....	46





3.5.3	Měření průtoku a tlaku .....	50
3.5.4	Ustálený stav chladicí okruh.....	51
3.5.5	Ustálený stav mazací okruh.....	52
3.5.6	Dynamický stav chladicí a mazací okruh .....	53
3.5.7	Průběh teplot na vstupu a výstupu vody z chladiče.....	55
3.5.8	Rozdíl teplot na vstupu a výstupu vzduchu z chladiče.....	56
3.5.9	Průběh teplot v chladiči .....	56
3.5.10	Tepelný výkon chladičů.....	57
4	Úpravy chladicího systému .....	60
4.1	Optimalizace chladiče.....	60
4.2	Optimalizace proudění přes chladič.....	60
4.3	Ventilátor .....	61
	Závěr.....	62
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	64



## ÚVOD

Chladicí systém slouží pro odvod přebytečného tepla z motoru. Teplo vzniká při spalování paliva přestupem do válce, hlavy a pístu motoru. Dalšími zdroji tepla jsou ložiska, kontakty součástí, spojka a turbodmychadlo. Vygenerované teplo je potřeba odvést chladicím systémem pro udržení vhodné teploty motoru. Teplo je z jednotlivých částí odváděno převážně přestupem do chladicí kapaliny. Chladicí kapalina předává toto teplo do okolí ve výměníku voda-vzduch. Spalovací motor pracuje optimálně v úzkém rozmezí teplot. Vysoká teplota se negativně projevuje na životnosti a opotřebení součástí. Nízká teplota naopak vede k vyšší spotřebě.

Pro zlepšení chlazení motoru a příslušenství jsou provedeny měření jednotlivých částí chladicího systému, měření parametrů chladičů a měření ve větrném tunelu. Naměřené charakteristiky jsou porovnány s měřením při jízdě vozidla a použity pro výpočty parametrů, které není možné přímo na voze měřit. Naměřené charakteristiky jsou porovnány a vyhodnoceny. Ze získaných poznatků jsou navrženy konstrukční změny na voze další generace pro zlepšení účinnosti chladicího systému.



# 1 FORMULE STUDENT

Formule student je výukový projekt zaměřený na vzdělávání a učení studentů vysokých škol po celém světě. Cílem projektu je postavit jednomístný závodní vůz splňující pravidla soutěže a na závodech jej porovnat s konkurencí dalších univerzit. Hodnoceny jsou dvě kategorie. První kategorií jsou statické disciplíny, které obsahují technickou prezentaci vozu a znalosti studentů, cenovou kalkulaci a vytvoření marketingového plánu na prodej série vozů. Druhá kategorie obsahuje dynamické disciplíny testující akceleraci vozu na 75 m, funkčnost podvozku při simulaci statického zatáčení a dvě disciplíny na trati doplněné o body za spotřebu. První disciplínou je jízda na trati z kuželů s šířkou tratě minimálně 3 m a délkou do 1.5 km. Následuje jízda na podobné trati dlouhé 22 km s povinnou výměnou řidičů po 11 km. Při této disciplíně se hodnotí spotřeba, která je vypočtena ze spotřeby a celkového času. [1]

## 1.1 TU BRNO RACING

Tým TU Brno Racing byl založen v roce 2011 na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství pod záštitou Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Tým je veden studenty a jen studenti se mohou zapojit do konstrukce a testování nového vozu. Každý rok se mění složení týmu, kdy na začátku semestru je pořádán náborový program a poté jsou vybráni studenti, kteří mají chuť pokračovat. [2]

Zimní semestr je věnován stavbě, simulacím a testování vhodných komponent, metod výroby a materiálů. V letním semestru začíná stavba vozu, jeho představení veřejnosti a samotné testování. Vše se musí vyzkoušet a otestovat, aby byl vůz spolehlivý a aby se našlo optimální nastavení vozu pro různé disciplíny, povrchy a tratě připravované na závodech. Při testování probíhá souběžně validace nasimulovaných parametrů vozu pro porovnání simulace s realitou. Zlatým hřebem sezóny jsou závody, kdy tým soutěží s ostatními týmy na závodech. Zde se projeví spolehlivost vozu a schopnost, adaptace se na nový povrch a trať i celková technická a organizační schopnost týmu fungovat v jiném prostředí.



Obrázek 1 Foto českých týmů na závodě Formula Student Czech Republic 2018 [3]



## 1.2 PRAVIDLA PODLE FORMULA STUDENT GERMANY

Pravidla pro soutěž Formule student jsou tvořena organizacemi Formula Student Germany (FSG) a Society of Automotive Engineers (SAE) organizací. Pravidla tvořená podle SAE jsou tvořená od roku 1980 a platí pro závody po celém světě přibližně do roku 2017, kdy se organizátoři FSG rozhodli pro vytvoření vlastních pravidel podle vzoru SAE. Tyto pravidla postupně převzaly evropské soutěže a jsou dnes evropským standardem. Ačkoliv se pravidla liší v některých ohledech jen minimálně, jsou zde změny, které musí respektovat hlavně týmy, které se chtějí účastnit závodů pořádaných podle pravidel SAE. Vůz je navrhován podle pravidel FSG, která jsou použita na všech závodech, kterých se Dragon 8 účastnil. [1, 4]

Pravidla se zaměřují hlavně na bezpečnost řidiče a traťových komisařů a na omezení výkonových parametrů vozu. Pro motorovou část jsou velmi benevolentní omezující jen maximálním objemu motoru  $710 \text{ cm}^3$ , čtyřdobý cyklus motoru a omezení hybridních systémů využívajících elektromotor k pohybu vozu z externího zdroje energie. Výkonově je spalovací motor omezen restriktorem na sání, kdy podle typu paliva je určen průměr 20 mm pro benzín a 19 mm pro E85. [1]

### 1.2.1 PRAVIDLA PRO CHLADÍCÍ A MAZACÍ SYSTÉM

Pravidla pro chladicí a mazací systém jsou velmi stručná, zahrnující jen základní požadavky a omezení na bezpečnost a zamezení kontaminace tratě chladicí kapalinou a olejem.

#### CHLADÍCÍ KAPALINA

Vodou chlazené motory musejí použít pouze destilovanou vodu. Pravidlo zabraňuje kontaminaci tratě chladicí kapalinou běžně používanou v automobilech a motorkách. Limituje teplotu varu a zhoršuje mazání hřídele vodní pumpy, kdy je potřeba hřídel nitridovat, aby nedošlo k porušení od břitů gufera a ztrátě těsnosti. [1]

#### TĚSNĚNÍ CHLADÍCÍHO A MAZACÍHO SYSTÉMU

Jakýkoliv chladicí, nebo mazací systém musí být utěsněn proti zamezení úniku kapaliny. Toto pravidlo je důsledně kontrolováno na soutěžích při náklonovém testu a po absolvování dynamických disciplín. Náklonový test je zkouška naklopením vozidla o  $60^\circ$  s nejvyšším řidičem v řidičské pozici. Je sledován únik provozních kapalin, které jsou před testem doplněny na provozní úroveň a stabilita vozu, aby nedošlo ke zvednutí kol ze země. Po dynamických disciplínách je kontrolován motorový prostor a podlaha, jestli nedochází k úniku kapalin. Při úniku kapalin je tým vyřazen z bodování dynamické disciplíny. [1]

Oddělené zachytné nádoby musejí být požitý pro zachycení kapalin z odvodu chladicího a mazacího okruhu. Každý jednotlivý okruh musí mít zachytnou nádobu s minimálním objemem 10% obsahu kapaliny, nebo 900 ml. Použita je vyšší hodnota. [1]

Jakékoliv odvodu pro jiné systémy obsahující kapalně mazivo, nebo chladicí kapalinu musí mít zachytnou nádobu s minimálním objemem 10% kapaliny, nebo 100ml. Použita je vyšší hodnota. [1]



Záchytné nádoby, jejich uchycení a hadice musejí být z materiálu, který je dlouhodobě odolný teplotám minimálně 125 °C. [1]

Záchytné nádoby musejí být umístěny za ochrannou bariérou pro řidiče a pod řidičovými rameny. [1]

Všechny odvzdušnění záchytné nádoby na chladícím okruhu musejí vést hadicemi s minimálním vnitřním průměrem 3 mm a být vyvedeny do spodní úrovně rámu. [1]

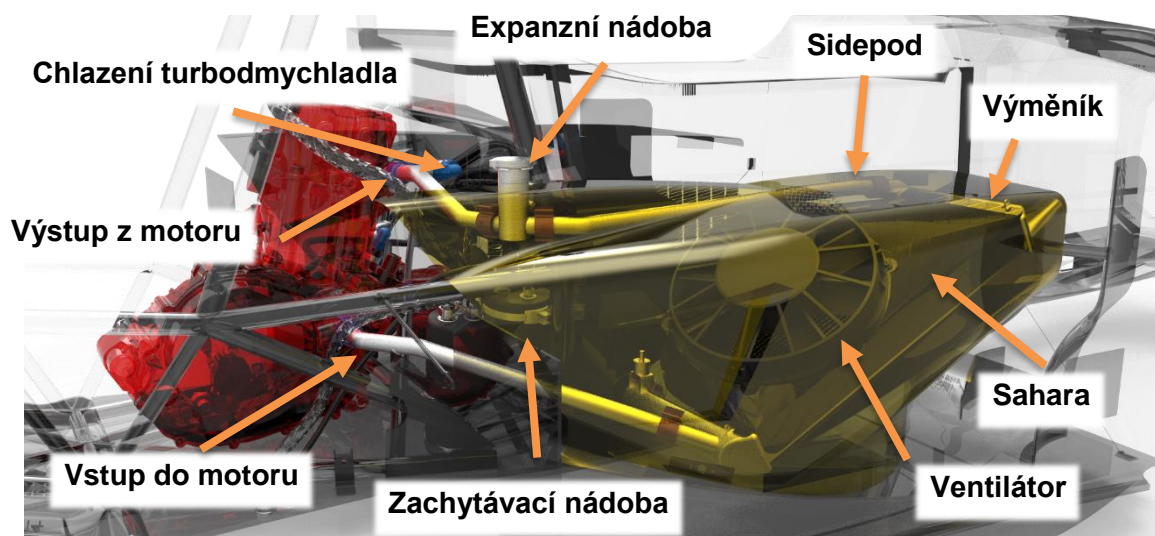
## 2 CHLADÍCÍ SYSTÉM DRAGONA 8

Pro zabezpečení správné teploty pro jednotlivé části spalovacího motoru a příslušenství se používají systémy odvodu přebytečného tepla do okolního prostředí. Teplo vzniká ve spalovacím motoru z chemické energie v palivu, která je přeměněna na práci, teplo odvedené výfukem a teplo přenesené do částí motoru. Na vývinu tepla se dále podílejí ložiska, kontakty ozubených kol a rozvodového mechanismu, spojka a v neposlední řadě turbodmychadlo. Toto teplo přenesené do částí motoru je nutné odvést pryč z motoru, aby byla zajištěna optimální teplota jednotlivých částí.

Chladicí okruh na voze Dragon 8 je specifický pro jednoválcový přeplňovaný motoru Huquarna FE 501 a jeho zástavbu do vozu formule student. Chladič a vstup chladicí kapaliny do motoru je rozdílný oproti aplikaci na motorce. Je potřeba upravit chladicí okruh do takové podoby, aby umožnil zástavbu chladiče do sidepodu a podřídil se požadavkům zástavby ostatních částí vozu s důrazem na nízkou hmotnost systému, vysokou spolehlivost a odolnost proti vibracím. Chladicí systém dále zajišťuje chlazení ložiskové skříně turbodmychadla.

### 2.1 ČÁSTI CHLADÍCÍHO SYSTÉMU

Chladicí systém se skládá z kompaktního výměníku voda–vzduch, oběžného čerpadla, expanzní nádoby, rozváděcích trubek a částí zajišťujících chlazení turbodmychadla. Na obrázku 2. je znázorněno umístění jednotlivých komponent chladicího systému na voze.



Obrázek 2. Chladicí systém Dragona 8

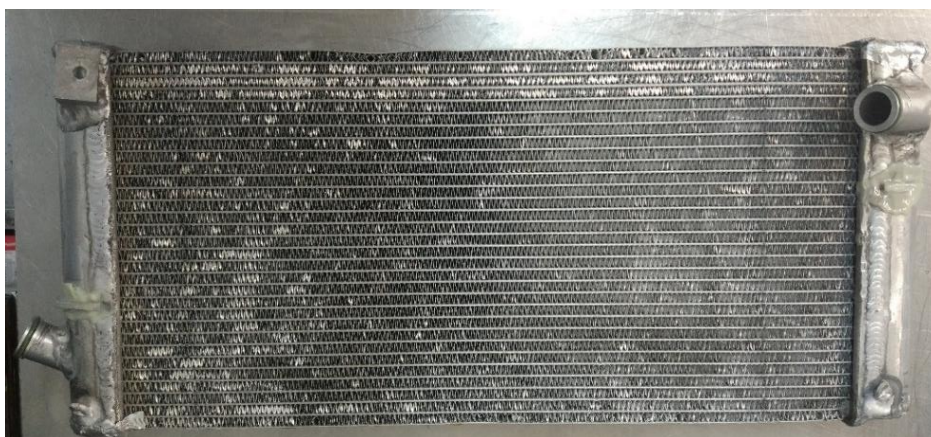
#### 2.1.1 VÝMĚNÍK VODA-VZDUCH

Výměník je umístěn ve střední části vozu na pravé straně v sidepodu, kde je skolněný po směru jízdy pro dosažení větší plochy a menšího zástavbového prostoru v sidepodu. Velikost chladiče ovlivňuje tvar a umístění sidepodu, kdy jeho narůstající velikost má negativní vliv na odpor vozu. Sidepod se stará o nasměrování proudu vzduchu na výměník a oddělení vstupního a výstupního vzduchu přes výměník.



Výměník je vyroben na zakázku firmou Hanon Systems podle návrhových parametrů délky, šířky, výšky a polohy vstupů chladicí kapaliny. Výměník se skládá ze vstupní a výstupní komory a jádra. Komory jsou tvarované podle zástavbových požadavků s většinou atypicky umístěným vstupem a výstupem vzhledem k sériovým výměníkům. Jádro je poté použito dopovídající průtoku chladiva s hustotou voštiny zajišťující dostatečný přenos tepla z lamel do voštiny a dále do chladicího vzduchu.

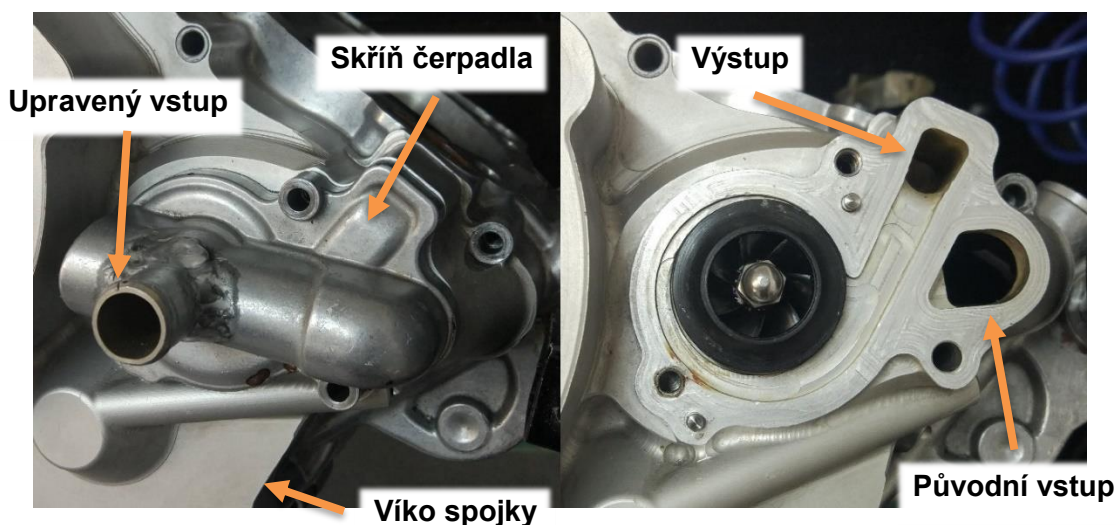
Výměník je uchycen na rám vozu přes dva silentbloky a dvě ocelová lanka zajišťující jeho polohu v sidepodu. Pružné uložení je nutné pro zabránění přenosu vibrací od motoru a vozovky do chladiče, je sníženo namáhání jádra chladiče, umožňující použití tenkých stěn jádra a komor.



Obrázek 3. Testovací tříchodý chladič

### 2.1.2 OBĚŽNÉ ČERPADLO

Oběžné čerpadlo se stará o rozvod chladicí kapaliny v motoru a chladicím systému. Je umístěno na vstupu chladicí kapaliny do motoru na víku spojky poháněné přímo od klikového hřídele přes vyvažovací hřídel. Umístěním čerpadla na vyvažovací hřídel jsou dosaženy shodné otáčky čerpadla s klikovou hřídelí dosahující hodnot  $10\,500\text{ min}^{-1}$ .

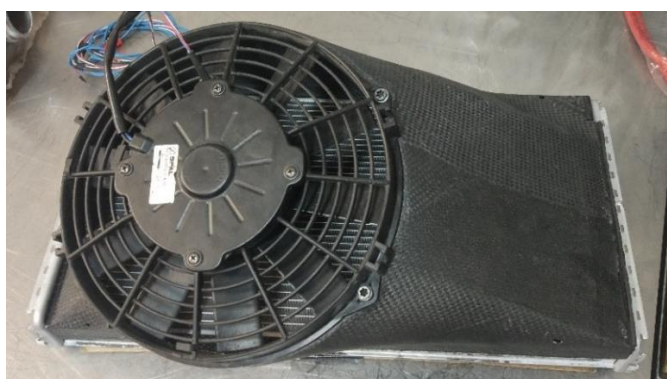


Obrázek 4. Skříň čerpadla (nalevo), rotor oběžného čerpadla na části skříně tvořené víkem spojky

Čerpadlo je odstředivé radiální, umožňující průtok chladiva přes čerpadlo i při vypnutém motoru pro dochlazení teplejších částí hlavy motoru termosifonovým efektem. Pro kompaktnější zástavbu je vytvořen nový vstup chladicí kapaliny přímo do skříně čerpadla, který umožnil jednodušší vedení chladicí kapaliny motorovým prostorem a eliminoval problematické vedení kolem výfukového svodu.

### 2.1.3 VENTILÁTOR A JEHO UCHYCENÍ

Ventilátor je umístěn za chladičem na sahaře, která utěsňuje celý chladič a zabraňuje přisávání vzduchu mimo chladič. Ventilátor je použit axiální sací s průměrem vrtule 225 mm a montážní výškou 51,1 mm. Ventilátor je napájen z rozvodného systému vozu s nominálním napětím 12 V a odběrem maximálně 8 A. Ventilátor je spínán řídicí jednotkou motoru při překročení teploty 85 °C chladicí kapaliny. Při jízdě není dále řízen, je spuštěn tedy vždy, pokud je teplota chladicí kapaliny vyšší než minimální požadovaná teplota. [5]

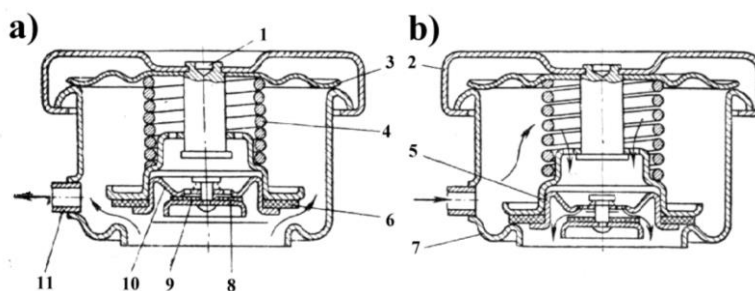


Obrázek 5. Ventilátor umístěný na sahaře

### 2.1.4 EXPANZNÍ NÁDOBA S REGULACÍ TLAKU

Expanzní nádoba je umístěna v nejvyšším bodě chladicího systému umožňující jeho odvzdušnění a naplnění. Je uzavírána přetlakovým a podtlakovým víčkem, které při překročení maximálního nastaveného tlaku kapaliny přepustí část chladicí kapaliny do záchytné nádrže pro snížení tlaku v systému. Obdobně je realizována i ochrana proti nízkému tlaku otevřením druhého kanálu víčka a umožňuje nasání kapaliny do chladicího okruhu pro zvýšení tlaku. [6]

Regulace tlaku je důležitá pro zvýšení tlaku ve fázi ohřívání a provozu vozu, kdy při použití destilované vody je posunut bod varu vyšším tlakem do teplot mimo provozní teploty motoru. Druhá fáze ochrany spočívá v zamezení imploze lamel výměníku vzhledem k jejich malé tloušťce stěn. [6]



Obrázek 6 Zátka chladiče s přetlakovým a podtlakovým ventilem, a) otevřený přepad do expanzní nádoby, b) otevřené sání kapaliny [6]





### 2.1.5 ROZVODNÉ TRUBKY A SPOJE TRUBEK

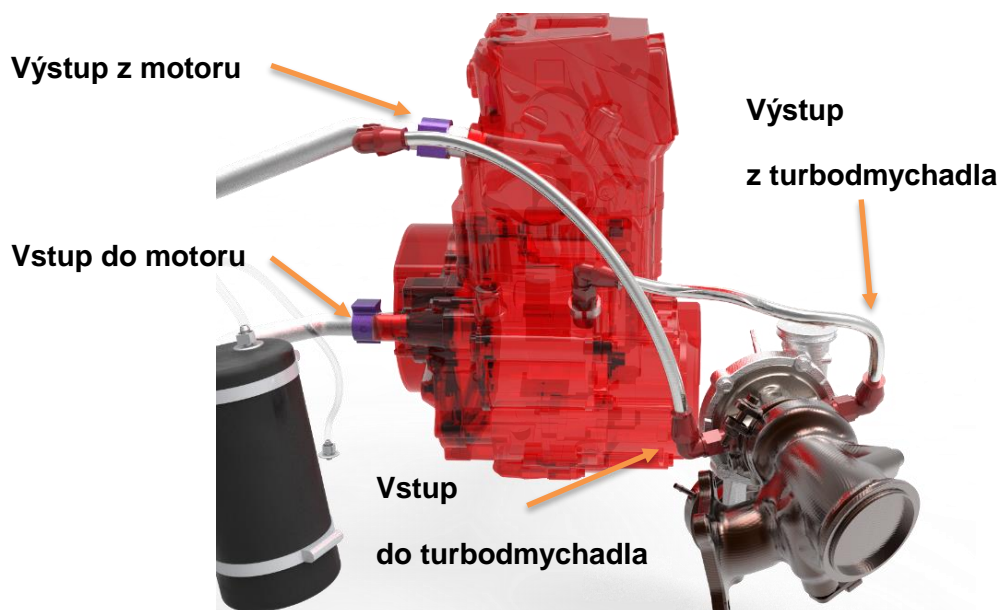
Pro spojení jednotlivých částí chladicího systému jsou použity ohýbané hliníkové trubky s navařovanými koncovkami pro spony Wiggins. Tyto spony zamezují axiální a radiální pohyb dvou konců hliníkových trubek, na které jsou navařeny koncovky s drážkou pro o-kroužek. Spoj těsní na o-kroužcích na každé trubce s převlečnou objímkou spojující jednotlivé koncovky. Toto spojení je snadno rozebíratelné, spolehlivé a není potřeba žádných nástrojů pro spojení a rozpojení jednotlivých trubek. Spojení dále umožňuje axiální pohyb trubek, jejich natažení a odklon od osy trubek. [7]



Obrázek 7. Sestava spony Wiggins

### 2.1.6 OKRUH CHLAZENÍ TURBODMYCHADLA

Turbodmychadlo má samostatný okruh vedoucí z výstupní trubky motoru do ložiskové skříně turbodmychadla. Z turbodmychadla je chladicí kapalina vedena do vstupu na přední straně motoru používaného na motorce pro vstup chladicí kapaliny. Pro vedení chladicí kapaliny jsou používány flexibilní hadice s nerezovým opletem zajišťující potřebnou odolnost a dostatečný průtok pro chlazení ložiskové skříně turbodmychadla. Okruh je znázorněn na obrázku 8.

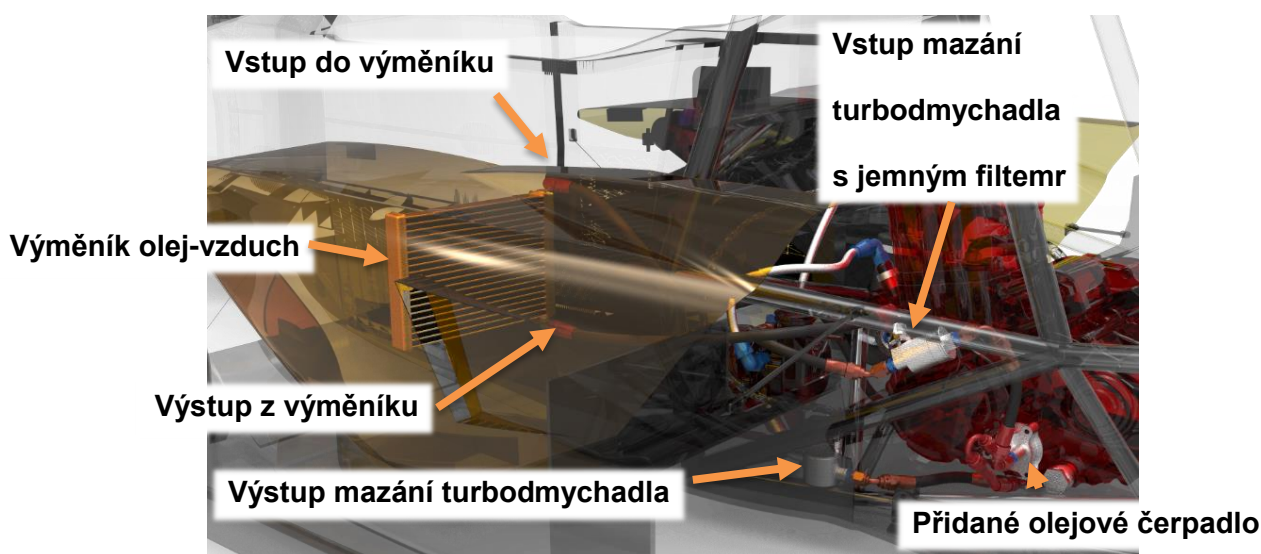


Obrázek 8. Chladicí okruh turbodmychadla



## 2.2 MAZACÍ SYSTÉM

Mazací systém se podílí také na chlazení motoru, motorovým olejem je odváděno teplo ze dna pístu, ložisek, spojky a od turbodmychadla. Je zde společná olejová náplň pro všechny komponenty, která je uložena v prostoru převodovky a spojky. Tato náplň je čerpána trochoidním čerpadlem umístěným v klikové skříni motoru do výměníku olej-vzduch. Po průchodu výměníkem je olej vedený zpět do motoru přes jemný filtr a následně k jednotlivým ložiskům a tryskám. Popsaný okruh se stará o zajištění dodávky oleje pro motor. Turbodmychadlo má vlastní okruh sestávající se z přidaného trochoidního čerpadla umístěného na společné hřídeli s čerpadlem pro primární okruh a čerpadlem pro odsávání oleje z prostoru klikového mechanismu.



Obrázek 9. Mazací systém Dragona 8

Výměník olej-vzduch je opět vyráběn firmou Hanon Systems podle zástavbových požadavků. Před výměníkem se nachází přivaděč vzduchu pro zvýšené toku vzduchu chladičem. Ventilátor není osazen pro zajištění stálého průtoku vzduchu z důvodu přidání hmotnosti a zvýšení energetické náročnosti, kterou by nebyl schopen alternátor zajistit. Při volnoběhu není potřeba intenzivního chlazení oleje oproti chlazení vody.

Nevýhodou výměníku olej-vzduch je pomalý ohřev oproti variantě použité na Dragonovi 6, kdy byl výměník realizován chlazením oleje přes výměník olej-voda. Tento výměník měl nevýhody ve vyšší zátěži vodního okruhu a svou konstrukcí výrazně zvýšil tlakovou ztrátu na mazacím okruhu.

## 2.3 ZÁZNAM Z DRAGONA 7 A 8

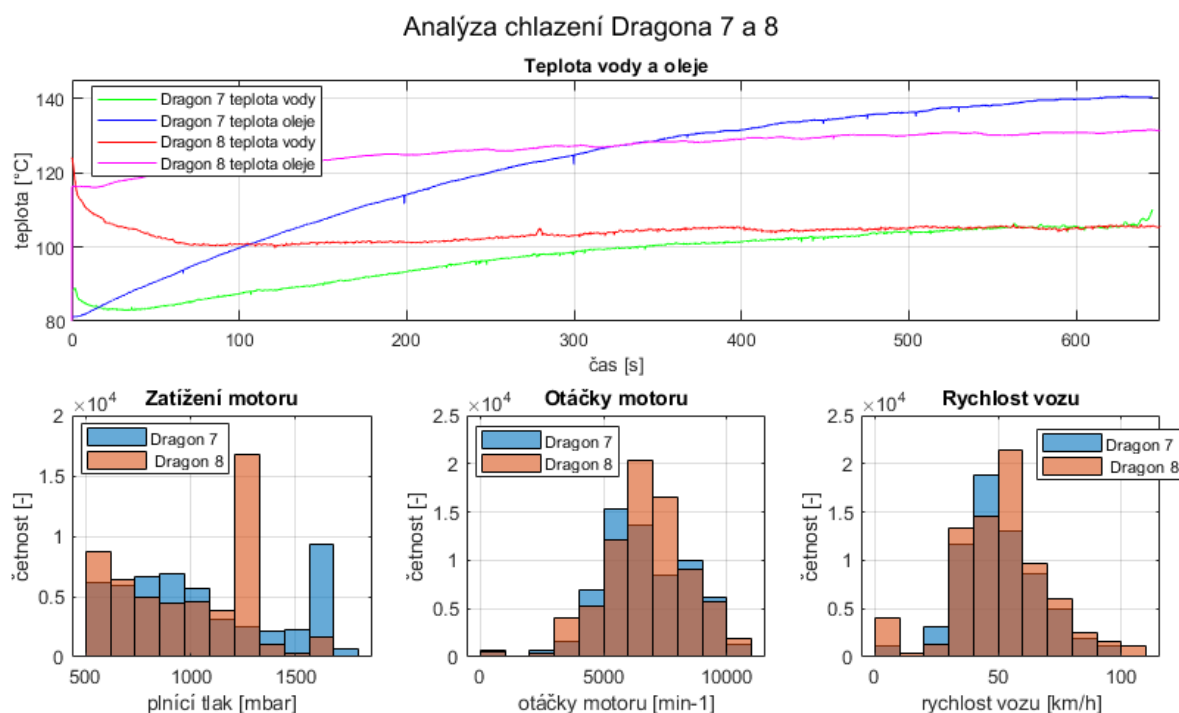
Při provozu vozu jsou zaznamenávány důležité teploty a tlaky pro kontrolu a řízení motoru. Mezi zaznamenávané signály patří teplota oleje a teplota vody. Teplota oleje je měřena ve skříni převodovky, jedná se tedy o teplotu oleje před nasátím do čerpadla a ochlazením výměníkem. Teplota vody je měřena v místech chladičského kanálu v hlavě motoru. Teplota vody je využita pro tvorbu korekce umožňující studený start a ohřívání motoru obohacením směsi při volnoběhu. Směs je potřebné obohatit pro zaručení startu a poté klidného chodu motoru, kdy při studeném provozu dochází k ulpívání paliva na stěnách válce a v sacích kanálech vedoucích k ochuzení výsledné směsi ve válci.



Data jsou vyhodnocována v reálném čase a po jízdě. Při jízdě vozu je sledován chod motoru, teploty a tlaky motorovým inženýrem starajícím se o provoz motoru. Při problémech jsou data následně analyzována pro zjištění příčiny problému.

### 2.3.1 PROVOZNÍ DATA

Na obrázku číslo 10. je zobrazen průběh teplot chladicí kapaliny a motorového oleje společně s histogramy četnosti výskytu hodnot plnicího tlaku, otáček motoru a rychlosti vozu. Data jsou vybrána z nejhorších stavů, které během sezóny Dragona 7 a 8 nastaly.



Záznam Dragona 7 pochází z testování na Brněnském výstavišti, kde byla testována vytrvalostní disciplína na 22 km s výměnou řidičů. Teplota okolního vzduchu byla 36 °C. Záznam je z jízdy prvního řidiče, kdy na začátku jízdy vyrážel vůz s teplotou vody zdnalivě vyšší, než je provozní teplota. Tento nárůst je způsoben umístěním senzoru teploty vody v hlavě motoru. Po zastavení vozu teplota roste od teplých částí hlavy, které nejsou dále chlazeny cirkulující kapalinou a dochází k lokálnímu přehřívání. V průběhu jízdy je patrný rychlý pokles teploty až na 83 °C způsobený ochlazením vody ve výměníku a promísením s vodou ve válci a hlavě. Teplota dále stoupá až na 106 °C. Z průběhu teploty je patrné nedostatečné dimenzování chladicího systému při daných podmínkách. Teplota oleje má konstantně rostoucí průběh, je tedy také nedostatečně dimenzováno chlazení motorového oleje. Vůz byl zastaven pro příliš vysokou teplotu oleje, kdy maximální hodnota přesahovala 140 °C, stanovený maximální limit pro teplotu oleje.

Data Dragona 8 pocházejí také z disciplíny na 22 km, tentokrát již ze závodů Formula Student East. Teplota vzduchu byla 34 °C Jsou zobrazeny data z jízdy druhého řidiče, který převzal vůz po 11 km. Řidiči mají tři minuty na výměnu s tím, že motor je zastaven. Po startu



je opět patrný rychlý pokles teploty vody shodně s předchozím záznamem. Pokles je z výrazně vyšší teploty, je tedy očividné lokální přehřátí částí motoru v oblasti hlavy. Rychlému odstavení motoru se nedá předejít, jelikož je řidič po ujetí daného počtu kol naveden na místo výměny řidiče bez možnosti dochlazení motoru pomalejším kolem. Po rychlém poklesu následuje ustálení teploty, která již v průběhu závodu výrazně nerostla oproti záznamu z Dragona 7, nicméně po 11 km se ustaluje na shodné hodnotě se záznamem z Dragona 7. Teplota oleje nevykazuje výrazný nárůst oproti Dragonovi 7, má však také neustále rostoucí trend. Pro trvalý provoz by byl tento nárůst problémem, při krátkých závodech na 22 km je tento nárůst akceptovatelný.

Rozdíl mezi záznamy je patrný také ze zatížení motoru, otáček motoru a rychlosti vozu na trati. Z rychlostního histogramu je názorná rozdílnost jednotlivých okruhů v poměrech četnosti výskytu rychlostí, kterými se vůz pohyboval. Záznam Dragona 8 je z rychlejší tratě, kdy hodnoty v rozsahu 0–10 km odpovídají čekání řidiče na volnou trať.

Profil tratě udává také spektrum otáček, ve kterých se bude motor pohybovat. Otáčky jsou ovlivněny možnou rychlostí průjezdu zatáčkami a převody třístupňové převodovky. Optimální otáčky motoru se nacházejí mezi 8 000 až 10 500 min<sup>-1</sup> pro akcelerace vozu.

Posledním nepopsaným grafem je histogram plnicího tlaku motoru. Zde je největší rozdíl mezi jednotlivými histogramy, kdy motor Dragona 7 byl řízen na maximální hodnotu plnicího tlaku 1 700 mbar, v případě Dragona 8 byla tato hodnota nastavena na 1 250 mbar. Snížení plnicího tlaku bylo provedeno na základě očekávaných problémů s chlazením a pro vyšší bodový zisk z disciplíny spotřeba. Dragon 7 měl tedy vyšší výkon motoru a společně s tím také vyšší tepelné zatížení jednotlivých částí motoru a chladicího okruhu.

Průběh teplot na Dragonovi 8 není optimální. Vykazuje horší chlazení i při nižším výkonovém nastavení motoru. Je potřeba provést měření, která objasní příčinu tohoto problému a umožní úpravy, které umožní využít plný potenciál motoru.





### 3 ANALÝZA CHLADÍČÍHO A MAZACÍHO SYSTÉMU

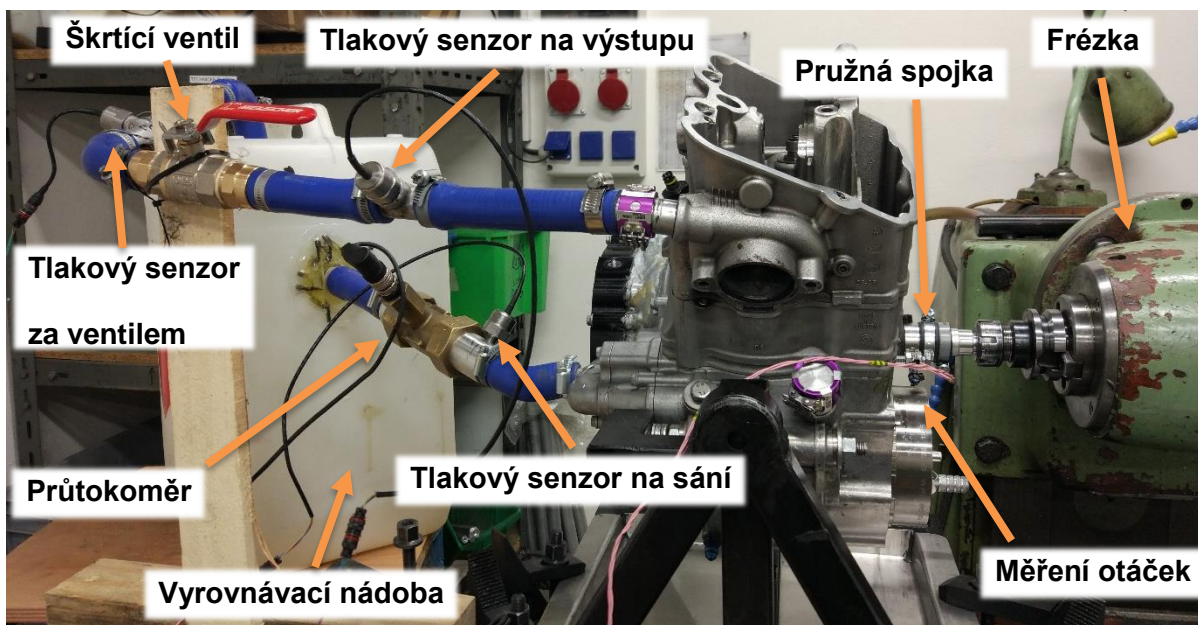
Pro analyzování chladíčího a mazacího systému je potřeba provést dílčí měření na jednotlivých částech systému a také měření na celém systému. Měřena byla charakteristika vodní a olejové pumpy vzhledem k otáčkám a škrcení průtoku na výtlačné straně, průtok vzduchu přes chladič ve větrném tunelu a měření na voze při jízdě. Samostatnou částí je zpracování charakteristik dodaných firmou Hanon Systems. Všechna měření jsou popsána v následujících kapitolách.

#### 3.1 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY ČERPADLA CHLADÍČÍ KAPALINY

Čerpadlo je použito shodné s typem používaným na motorech FE 510 a FS 450. Je poháněno od klikového hřídele s převodovým poměrem 1:1. Pro měření byl použit motor FE 510 se sériovým víkem spojky a upravenou skříní čerpadla pro montáž do vozu. Při měření je dbáno na zachování stejných podmínek odpovídajícím provozu na voze. Je tedy instalován válec a hlava motoru, jelikož přes ně proudí chladíčí kapalina na výstupu z čerpadla a vystupuje z hlavy v nejvyšším místě.

##### 3.1.1 POPIS MĚŘÍČÍHO ŘETĚZCE

Pro měření charakteristik čerpadla jsou zapotřebí snímače tlaku na vstupu do čerpadla, výstupu z motoru a snímač za škrticím ventilem. Pro měření průtoku je využit průtokoměr na sací straně čerpadla, poslední měřenou veličinou jsou otáčky náhrady klikového hřídele. Data jsou zaznamenávána na datalogeru a posléze vyhodnocována.



Obrázek 11. Měřicí stav poháněný frézkou



## MĚŘENÍ TLAKU

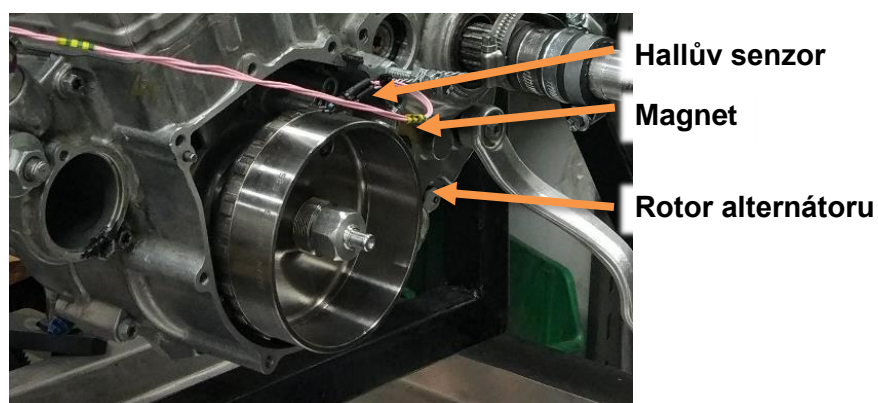
Pro měření tlaku jsou použity tlakové senzory od firmy KA Sensors v rozsahu 0-4 bary absolutně na sací straně a za škrticím ventilem. Pro měření tlaku na výstupu z motoru je použit senzor 1-10 barů relativně vzhledem k tlakům přesahujícím rozsah prvního senzoru. Senzor je umístěn kolmo na směr proudění, je tedy měřen statický tlak. Senzory jsou analogové s dodávanou kalibrací od výrobce. Jsou napájeny 5 V stejnosměrným napětím a signál je výstupní napětí v rozsahu 0,5 až 4,5 V. Technický list pro tlakový senzor 0 - 4 bary je přepsán do tabulky 1.

Tabulka 1. Technický list tlakového senzoru

Údaj	Hodnota	Jednotka
Pracovní rozsah	0–4 (absolutně)	Bar
Napájecí napětí	5	V
Posunutí nuly	0.489	V
Rozsah	4.005	V

## MĚŘENÍ OTÁČEK

Pro měření otáček byl zvolen Hallův senzor, který detekoval přítomnost magnetu umístěného na alternátoru. Při každém průchodu magnetu byl sepnut obvod a vyslán tak signál do datalogeru. Při opuštění snímané oblasti senzoru je obvod opět rozpojen. V datalogeru je nastavena detekce pulzu na náběžnou hranu signálu.



Obrázek 12. Umístění Hallova senzoru

## MĚŘENÍ PRŮTOKU

Průtok byl měřen axiálním průtokoměrem FVA 915 VTH25 s turbínou, která je kalibrována na 15 ml za jeden výstupní pulz. Výstupní signál je tedy digitálního charakteru s jednoduchou převodní funkcí násobku pulzů za čas konstantou udávanou výrobcem. Měření je z principu průtokoměru objemový průtok, který je dále možné přes hustotu kapaliny převést na hmotnostní tok. [8]



Průtokoměr je upraven na vstupu i výstupu pro možnost připojení menších hadic, které se používají na chlazení. Tyto redukce jsou dále využity na připojení potřebných senzorů při měření.



Obrázek 13. Průtokoměr s tlakovým a teplotním senzorem

## DATALOGGER

Pro zaznamenávání průběhu signálů a napájení senzorů je použit dataloger Omega L2 od firmy Cosworth. Poskytuje dostatečný analogově-digitální 12bitový převodník s možností zaznamenávání až na 1 kHz, digitální vstupy a 128 MB paměti pro ukládání záznamů. [9]

Pro měření tlaku jsou využity analogové vstupy pro tlakové senzory. Tlakový senzor je definován pomocí vyhledávací tabulky, ve které jsou zaneseny hodnoty odpovídající kalibraci od výrobce senzoru. Tlakový senzor je kalibrován na hodnotu 0 bar při napětí 498 mV a tlaku 4 bary s napětím 4 503 mV. Hodnoty uvnitř tohoto intervalu jsou poté přes interpolační lineární funkci převáděny na hodnotu tlaku zobrazovanou v datalogeru.

Details

Sensor Name

Comment

Calibrated Channel

Name

Quantity

Unit

Data Type

Uncalibrated Input

Name

Quantity

Unit

Termination

☒ None

☐ Pull-down

☐ Pull-up

Value  Ohms

Calibration

Look-up Table

	x [mV]	p_voda_vstup [bar]	Type
Add	498,00	0,00	<input type="radio"/> Extrapolation
<input checked="" type="radio"/>	4503,00	4,00	<input checked="" type="radio"/> Interpolation
			<input type="radio"/> Sample & Hold

Equation

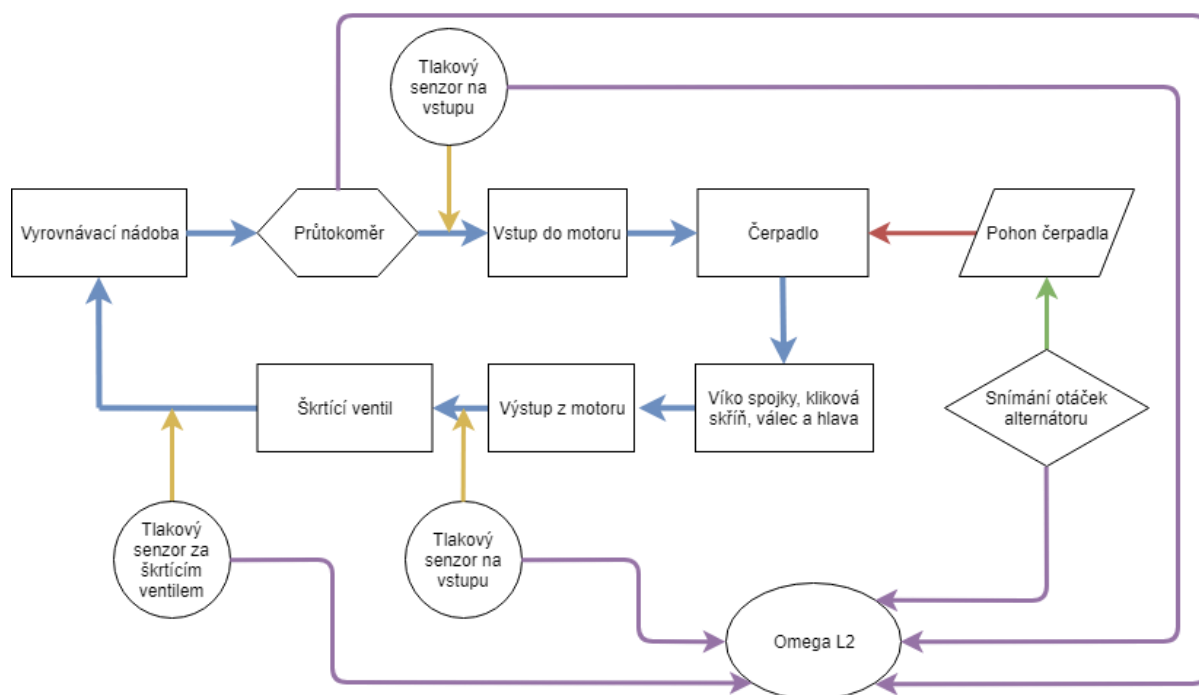
Obrázek 14. Definování tlakového senzoru 0-4 bary v programu Pi Toolset 5.3



Pro snímání otáček a průtoku jsou využity digitální vstupy, které umožní zaznamenat jen hodnotu 0 nebo 1, jsou tak určeny pro zaznamenání signálu pulzního charakteru. Hodnotu otáček není potřeba převádět, je udávána přímo v Hz zaznamenaných datalogerem. Průtok je převáděn z frekvence na objemový průtok násobením 0.015 hodnotou odpovídající 15 ml na jeden pulz.

### SCHÉMA MĚŘICÍHO ŘETĚZCE

Schéma je uvedeno na obrázku 15. Obdélníky s modrými šipkami je vyznačen okruh kapaliny s jednotlivými prvky, kterými protéká kapalina. Součástí okruhu je také průtokoměr, přes který kapalina musí protéct. Žlutou barvou je zobrazeno připojení tlakových senzorů. Tlak měřený na vstupu do čerpadla (dále jen  $p_1$ ), tlak na výstupu z motoru (dále jen  $p_2$ ) a tlak za škrťacím ventilem (dále jen  $p_3$ ) jsou zaznamenávány do datalogeru. Čerpadlo je nutné pohánět, schéma celé pohonné sestavy není součástí schématu pro zjednodušení a přehlednost. Je zde uveden senzor otáček, který snímá otáčky alternátoru. Fialovou jsou znázorněny signály od jednotlivých senzorů.



Obrázek 15. Schéma měřicího řetězce

### PŘÍSLUŠENSTVÍ

Příslušenstvím je vyrovnávací nádoba, škrťací ventil a pohonné ústrojí.

Vyrovnávací nádoba slouží pro zajištění dostatečného objemu kapaliny na straně sání čerpadla. Eliminuje možné vzduchové bubliny, které by se vyskytovaly v uzavřeném okruhu. Při měření vznikalo nemalé množství tepla, které dokázala voda v nádrži pojmout a nedocházelo tak k ohřívání klikové skříňe od ložisek.



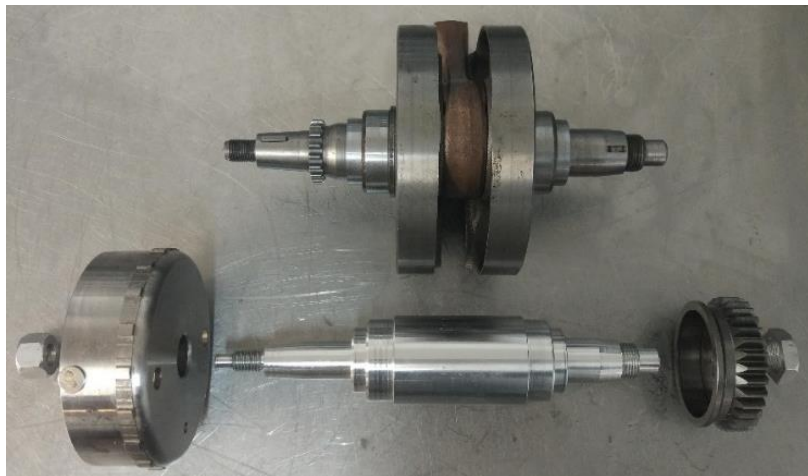


Škrtící ventil je realizován kulovým ventilem s ručním pákovým řízením otevření. Ventil je volen s vnitřním průměrem větším než používané trubkové vedení, pro zmenšení tlakových ztrát při plném otevření. Tato volba se ukázala vhodná pro maximální otevření. Při menších otáčkách a nutnosti nastavit škrcení pro jednotlivé body se projevuje velká citlivost na malé změny otevření. Pro jemnější nastavení by byl vhodný menší ventil, který by byl použit při malých průtocích, nejlépe se šroubovým typem uzavírání místo pákového. Tento typ ventilu by bylo možné dále automatizovat vhodným servomotorem, nebo krokovým motorem.

Pohon byl realizován frézku na dílnách formule student. Frézka má asynchronní motor dostatečně výkonný pro pohon sestavy a zajišťuje konstantní otáčky po celou dobu měření. Nevýhodou je rychlý náběh momentu, který trhal pryžové spojky. Pryžová spojka byla použita pro spojení výstupní hřídele a výstupu z frézky, kompenzující nesouosost hřídelů.

Pro zajištění přenosu momentu z frézky na čerpadlo je použita originální převodovka s lamelovou spojkou. Převodovka zajišťuje více nastavení otáček motoru, jelikož otáčky frézky jsou mechanicky řazeny na převodovce, není tak možná plynulá regulace otáček. Z těchto omezení vycházejí otáčky, při kterých jsou měřeny charakteristiky čerpadla.

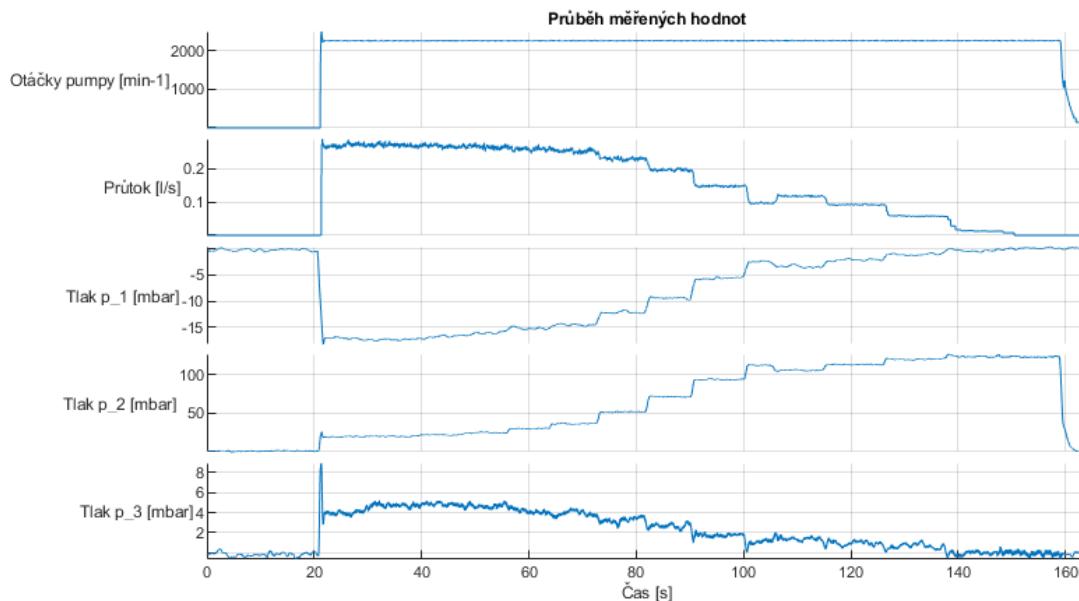
Kliková hřídel je nahrazena hliníkovým obrobkem, který má osazení na válečková ložiska a kužely pro uchycení primárního převodu mezi spojkou a klikovou hřídelí a pro uchycení rotoru alternátoru. Na obrázku 18. je náhrada klikového hřídele s primárním převodem a rotorem alternátoru. Moment je přenášen přes svěrný spoj mezi náhradou klikového hřídele a pastorkem. Na obrázku 16. je zobrazen klikový hřídel a jeho náhrada. Na konce náhrady je umístěn rotor alternátoru (nalevo) a pastorek primárního převodu (napravo).



*Obrázek 16. Náhrada klikového hřídele s rotorem alternátoru a pastorkem primárního převodu*

### 3.1.2 POSTUP MĚŘENÍ

Měření probíhalo vždy při konstantních otáčkách frézky změnou škrcení na výtlačné straně. První bod byl měřený při plně otevřeném ventilu a postupným zavíráním ventilu docházelo ke změně průtoku a tlakového spádu. Po nastavení ventilu je vyčkáno na stabilizování měřených veličin a je změřen jeden bod. Hodnoty jsou průměrovány z minimálně pěti sekundového časového úseku pro eliminaci šumu a měření nestacionárního stavu. Na obrázku 17. je zobrazen průběh měřených veličin v čase.



Obrázek 17. Průběh měřených veličin

Na horním grafu jsou vyneseny otáčky náhrady klikového hřídele v  $\text{min}^{-1}$ . Otáčky jsou po celou dobu měření udržované na konstantní hodnotě velkým momentem setrvačnosti frézky a synchronním motorem. Druhý graf zobrazuje průtok vody v  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$  měřený průtokoměrem. Průtok je maximální na počátku měření a zmenšuje se se zavíráním škrtícího ventilu. Při měření bylo zvoleno deset měřících bodů pro jednotlivé otáčky. Pro menší otáčky čerpadla bylo obtížné dosáhnout tohoto počtu vzhledem k možnostem nastavení ventilu a citlivosti čerpadla.

Průběhy tlaků jsou zobrazeny na posledních grafech. Tlaky  $p_1$  a  $p_2$  odpovídají otevření ventilu, kdy se zvyšujícím se škrcením roste tlak na sání a také na výtláčné straně. Na sání tlak roste, jelikož je nasáváno menší množství vody. Tlak na výtláčné straně roste se zvyšujícím se zavřením ventilu do maximální hodnoty, kdy je ventil plně uzavřený a čerpadlo dosáhne maximálního tlaku. Tlak  $p_3$  je ovlivněn velmi málo změnou proudění. Signál je oproti předchozím tlakům zkreslen. Tento průběh může být způsoben nevhodnou montáží senzoru, nebo tvorbou vířivého proudění na výstupu ze škrtícího ventilu a následným průchodem přes ohyb hadice.

### 3.1.3 CHARAKTERISTIKY ČERPADEL

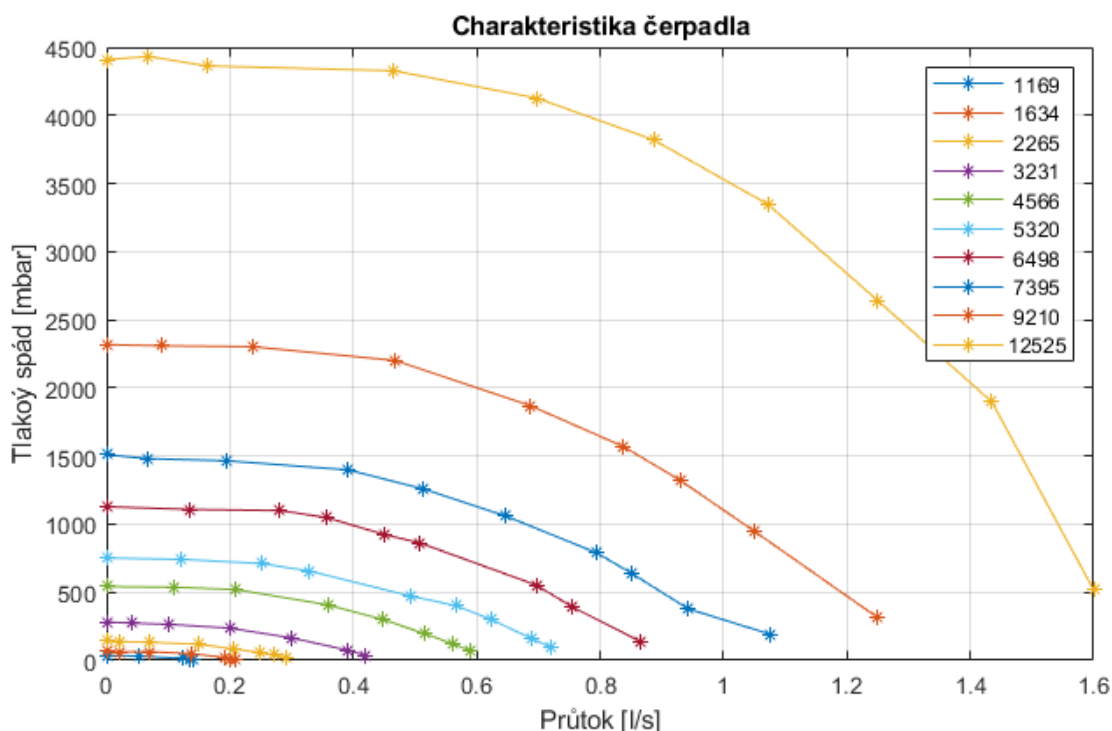
Měřeny byly dvě čerpadla. První čerpadlo originální, druhé vyráběné pro zvětšení průtoku v sezóně Dragona 5. Jedná se o hliníkový obrobek, který má shodný průměr s originálním čerpadlem. Zvětšená výška čerpadla měla zajistit vyšší průtok a vyšší výstupní tlak. Pro instalaci je potřeba umístit osazení na víko spojky, na které je poté instalována skříň čerpadla. Při měření charakteristik čerpadel byly dále změřeny průtoky chladiče při rozdílných otáčkách. Z okruhu byl vyjmut škrtící ventil a nahrazen chladičem.



Obrázek 18. Originální čerpadlo(vlevo) a upravené čerpadlo(vpravo)



## ORIGINÁLNÍ ČERPADLO

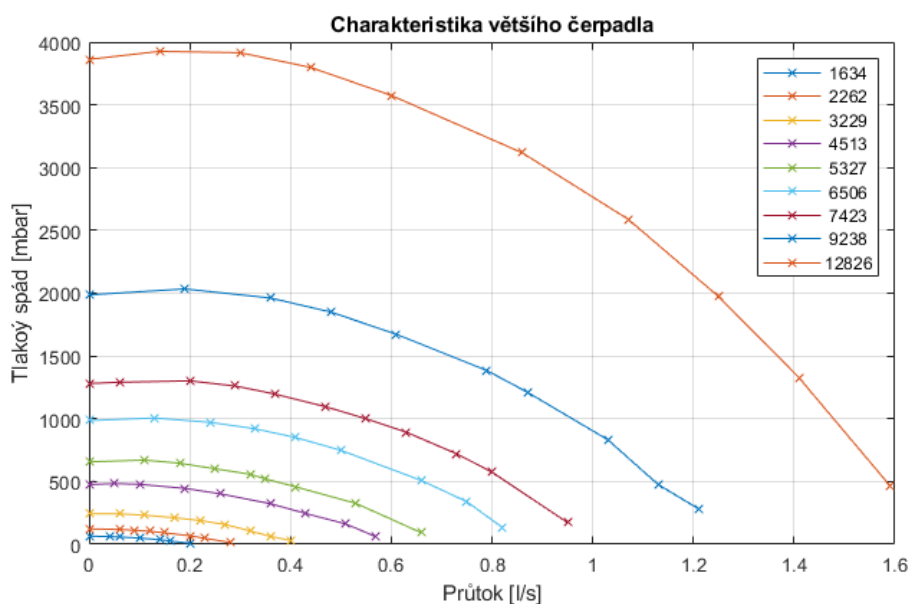


Obrázek 19. Charakteristika originálního čerpadla

Charakteristika čerpadla je vynášena do grafu průtoku a rozdílu tlaků na výstupu z motoru(p\_2) a tlaku za škrticím ventilem(p\_3). Křivky spojují konstantní otáčky čerpadla. Naměřená charakteristika čerpadla odpovídá očekávané charakteristice lopatkového stroje. Nejvyššího průtoku je dosahováno při minimálním odporu a maximálního tlaku dosahuje čerpadlo při zavřeném výtlaku. Otáčky jsou voleny od 1169 po 12 525  $\text{min}^{-1}$ . Je tedy pokryté celé spektrum provozních otáček, ve kterých se motor pohybuje.

## UPRAVENÉ ČERPADLO

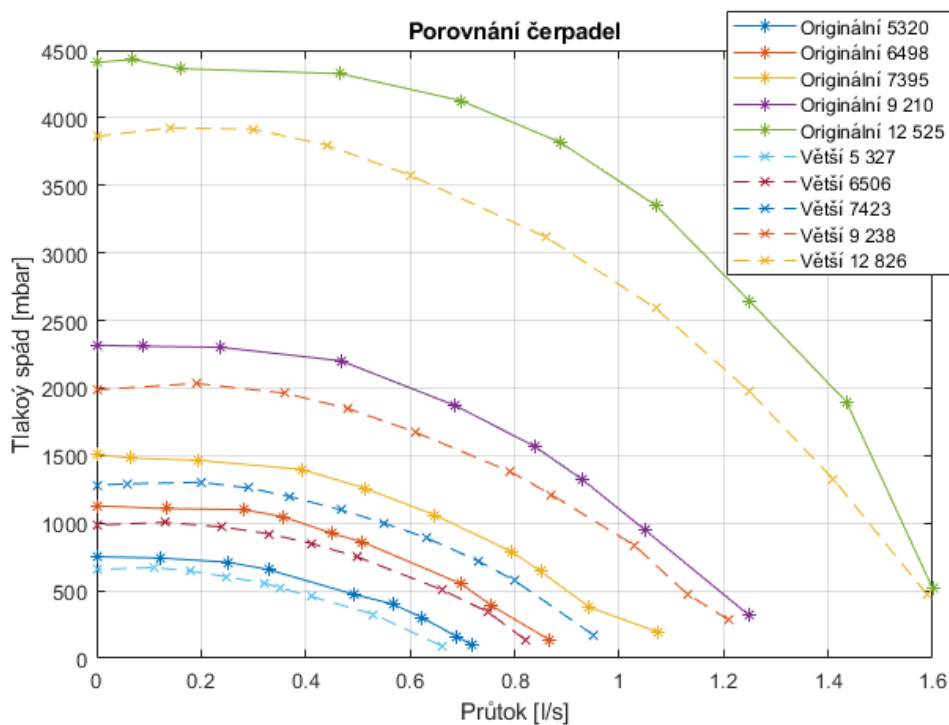
Pro větší čerpadlo byla změřená charakteristika shodně s originálním čerpadlem. Charakteristika většího čerpadla je podobná charakteristice originálního čerpadla. Na obrázku 20. je zobrazena naměřená charakteristika.



Obrázek 20. Charakteristika většího čerpadla

### POROVNÁNÍ ČERPADEL

Pro porovnání jsou vloženy do jednoho grafu charakteristiky originálního a většího čerpadla. Otáčky jsou vyneseny jen pro posledních pět měřených otáček. Podle naměřených hodnot je patrný menší průtok čerpadla a nižší tlakový spád dosažený čerpadlem. Podle získané charakteristiky nepřinesl rozměrově vyšší rotor nárůst průtoku, nebo tlakového rozdílu. Použití zvětšeného rotoru nepřináší zlepšení vzhledem k originálnímu rotoru, nebude tedy dále uvažováno použití většího rotoru.

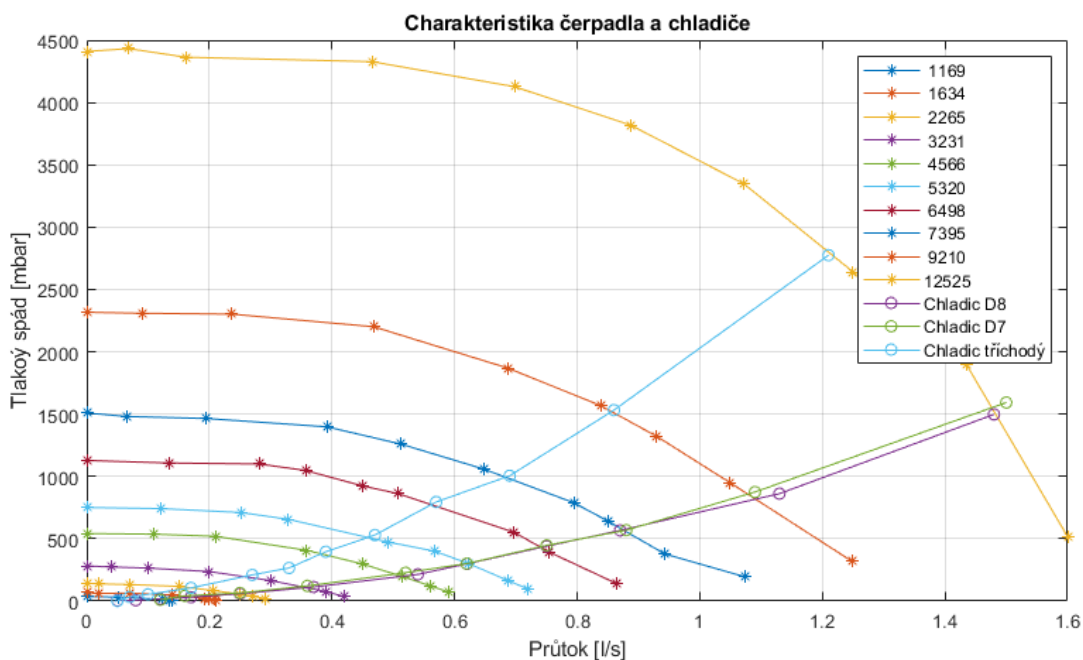


Obrázek 21. Porovnání originálního čerpadla a většího čerpadla



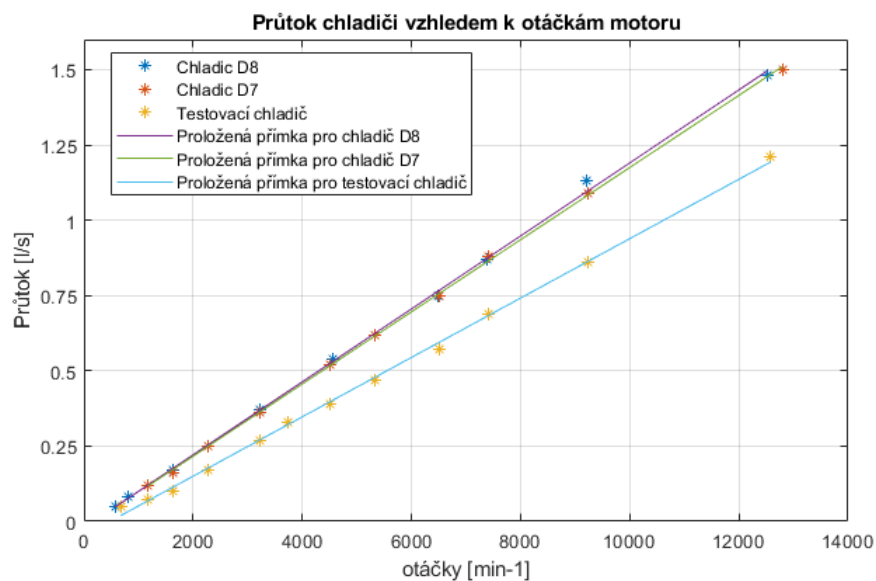
### 3.1.4 MĚŘENÍ PRŮTOKU CHLADIČÍ

Při měření byl nahrazen škrťací ventil chladičem a měněny otáčky čerpadla. Změřeny byly chladiče z Dragona 7 a 8 a testovací chladič. Testovací chladič se liší od dvou předchozích chladičů svojí konstrukcí. Kapalina je vedena třikrát přes délku chladiče, chladič by měl tmít vyšší tlakovou ztrátu než jednochodé chladiče použité na Dragonovi 7 a 8. Průtoky jsou vyneseny v charakteristice originálního čerpadla pro zobrazení pracovního rozsahu čerpadla.



Obrázek 22. Charakteristika čerpadla s chladiči

Podle naměřených hodnot je patrná shodná konstrukce a hydraulické vlastnosti chladičů Dragona 7 a 8. Chladiče mají jen minimální odchylky v jednotlivých otáčkách, kdy tato odchylka může být způsobena nejistotou měření. Testovací chladič podle očekávání má vyšší tlakovou ztrátu a menší průtok. Tyto horší vlastnosti by měly být vyváženy vyšší účinností chladiče.



Obrázek 23. Průtok chladiči vzhledem k otáčkám motoru

Na obrázku 23. je zobrazen průtok chladiči vzhledem k otáčkám klikového hřídele. Průběh průtoku v závislosti na otáčkách bude později využit při výpočtu chladícího výkonu a porovnání stacionárních a nestacionárních průtoků chladičem. Využita bude lineární závislost průtoku na otáčkách, kterou je možné popsat přímkou.





### 3.2 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY OLEJOVÉHO ČERPADLA

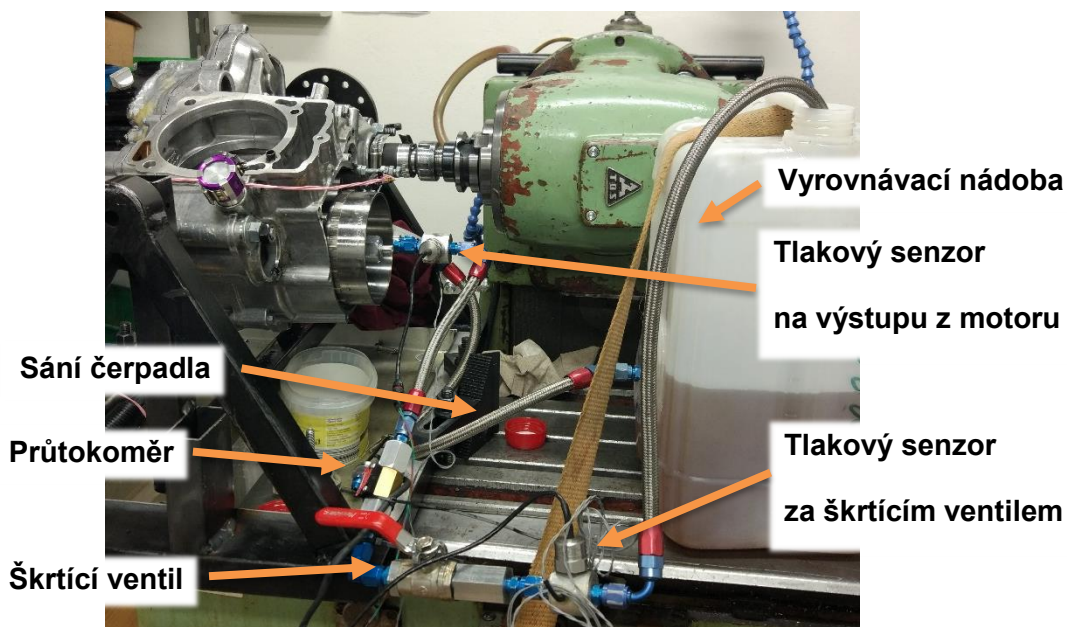
Olejové čerpadlo bylo měřeno podobně s vodním čerpadlem na měřicím stavu poháněném frézou. Konstrukčně je čerpadlo odlišné vzhledem k vodnímu čerpadlu. Čerpadlo je trochoidní, pracující na principu zmenšování objemu nasátého média a tím probíhá stlačení kapaliny. Odstředivé čerpadlo předá kapalině energii ve formě rychlosti, která je převedená na tlak v difuzoru čerpadla. Při uzavírání výtlaku čerpadla dochází ke zvyšování tlaku na výtlačné straně a zároveň k toku kapaliny mezerami mezi rotorovými koly a statorem. Tento tok je ovlivněn vůlemi, stavem čerpadla, tlakem na výstupu a viskozitou kapaliny.



Obrázek 24. Trochoidní čerpadlo

#### 3.2.1 POPIS MĚŘICÍHO ŘETĚZCE

Měřicí řetězec je podobný s předchozím měřením. Měřen je průtok oleje, otáčky náhrady klikového hřídele a tlak na výstupu z čerpadla a za škrťacím ventilem. Měřené veličiny jsou zaznamenávány v datalogeru s následným vyhodnocením.

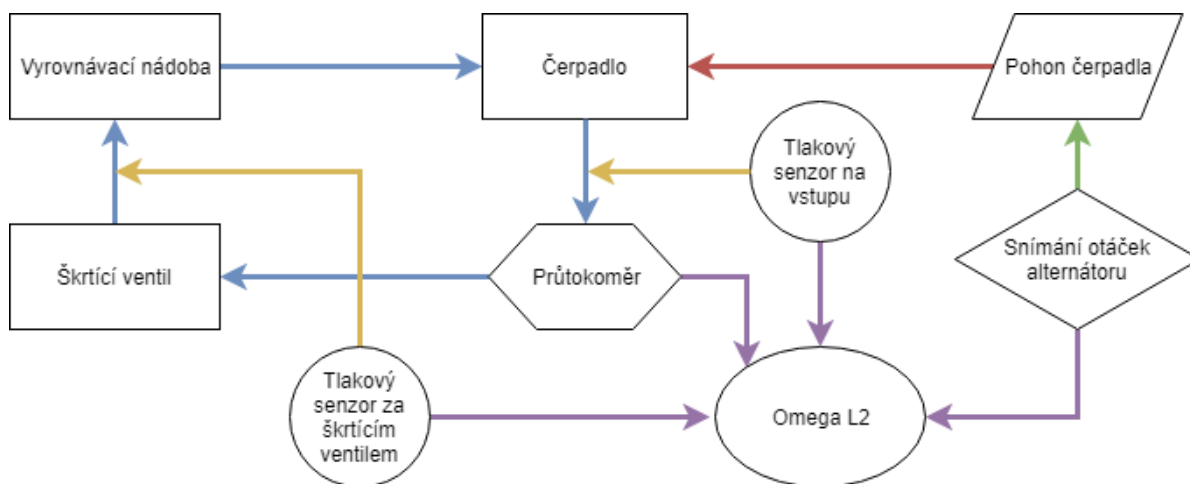


Obrázek 25. Měřicí stav pro měření oleje



### SCHÉMA MĚŘÍČÍHO ŘETĚZCE

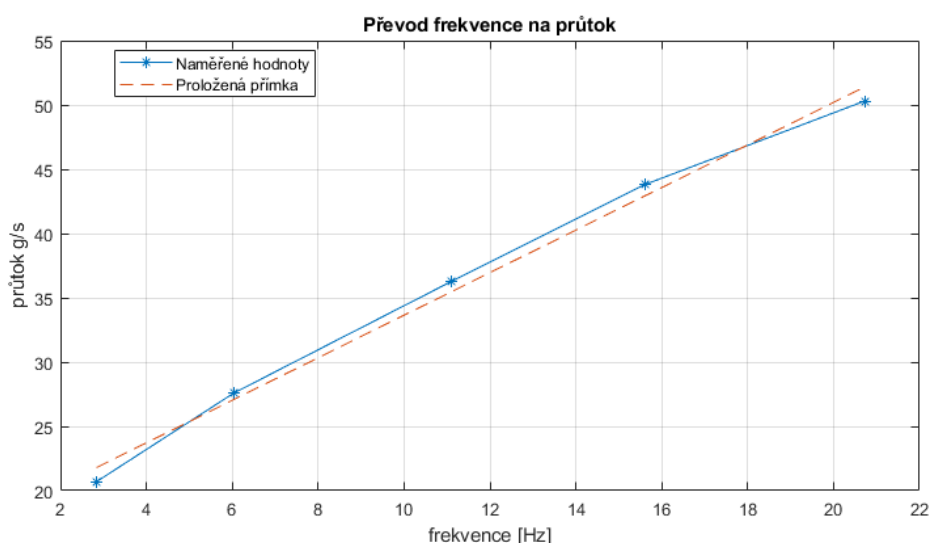
Měřicí řetězec je znázorněn na obrázku 26. Sání oleje probíhá z vyrovnávací nádoby přes hadici do skříně čerpadla. Čerpadlo následně olej vytlačí do měřicí části okruhu, ve které je měřen tlak před škrťacím ventilem a následně za škrťacím ventilem. Olej se poté vrací do vyrovnávací nádoby zajišťující stálý objem oleje pro čerpadlo. Tlakové senzory jsou použité shodné s předchozím měřením 1-10 barů před škrťacím ventilem a 0-4 bary za škrťacím ventilem. Měření otáček je shodné s předchozím měřením snímáním otáček alternátoru Hallovým senzorem.



Obrázek 26. Schéma měřicího řetězce pro měření olejového čerpadla

### PRŮTOKOMĚŘ

Průtokoměr byl použit axiální turbínový s pulzním výstupem. K průtokoměru nebyla dodána kalibrace odpovídajícího množství průtoku kapaliny za jeden pulz, bylo tedy nutné provést kalibraci. Kalibrace byla provedena odměřením frekvence průtokoměru za konstantních otáček a zvážení protečeného množství oleje. Naměřené hodnoty jsou uvedeny na obrázku 27.



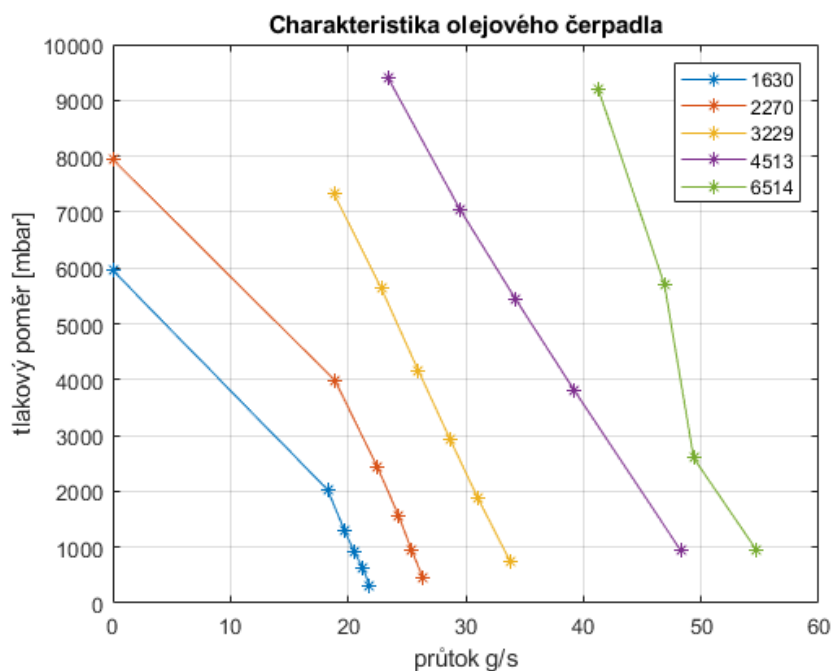
Obrázek 27. Kalibrace olejového průtokoměru





### 3.2.2 CHARAKTERISTIKA OLEJOVÉHO ČERPADLA

Charakteristika olejového čerpadla je vynášena shodně s charakteristikou vodního čerpadla do grafu zobrazujícího průtok oleje v  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$  a rozdíl tlaků před a za škrťacím ventilem. Křivky znázorňují konstantní otáčky klikového hřídele. Změna rozdílu tlaků je prováděna škrťacím ventilem. Křivkou jsou spojeny konstantní otáčky náhrady klikového hřídele.



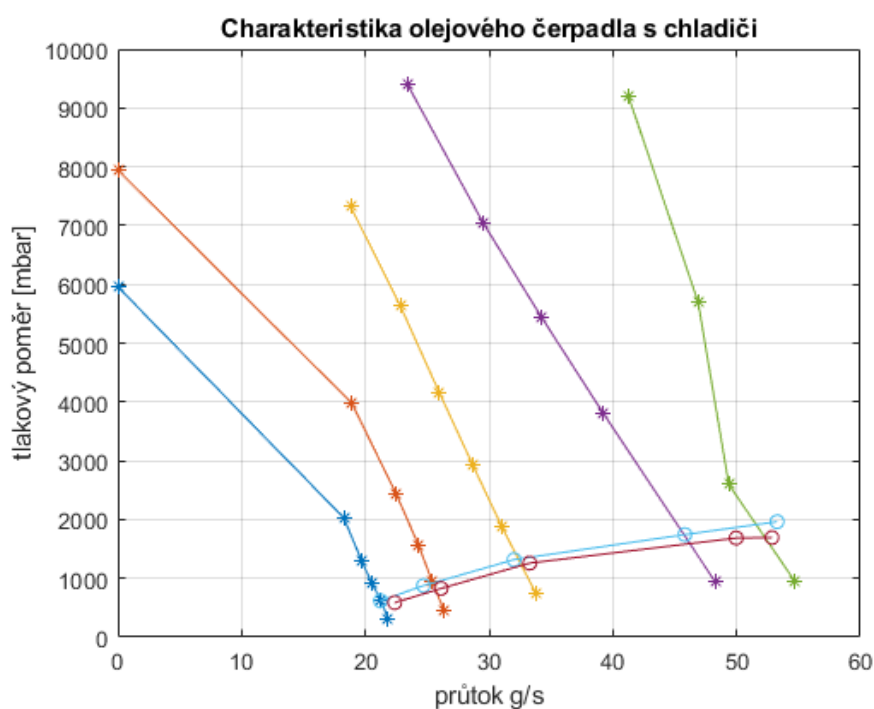
Obrázek 28. Charakteristika olejového čerpadla

Maximálních průtoků je dosahováno při plném otevření ventilu se ztrátou vedením, místní v průtokoměru a použitých fitinkách. Minimální hodnota nastává při zavřeném ventilu. Pro malé otáčky bylo možné plně uzavřít ventil, nedošlo k překročení maximálního tlaku pro tlakový senzor, při vyšších otáčkách bylo možné větším škrcením dosáhnout tlaku vyššího než 10 barů.

Čerpadlo bylo měřeno bez přepouštěcího ventilu. Ventil se stará o omezení maximálního dodávaného tlaku čerpadlem při vyšších otáčkách s omezením na 4,5 bary relativního přetlaku. Čerpadlo je tedy omezeno tímto regulátorem, který přepouští přebytečný olej z výtlačného kanálu do sacího.

### 3.2.3 MĚŘENÍ PRŮTOKU PŘES CHLADIČE

Při měření charakteristiky čerpadla byly do okruhu zapojeny také olejové chladiče pro odměření tlakové ztráty a průtoku oleje. Vyjmul byl škrťací ventil, zbylé prvky jsou shodné s předchozím měřením.



Obrázek 29. Průtok chladiči

Měřeny byly dva chladiče olej-vzduch z Dragona 7 a 8. Konstrukčně jsou si podobné, jedná se o dvouchodé kompaktní výměníky vyráběné firmou Hanon Systems podle zástavbových požadavků a maximálních tlaků v systému.



Obrázek 30. Olejové chladiče Dragona 7(nalevo) a Dragona 8(napravo)



### 3.3 MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU PŘES CHLADIČ

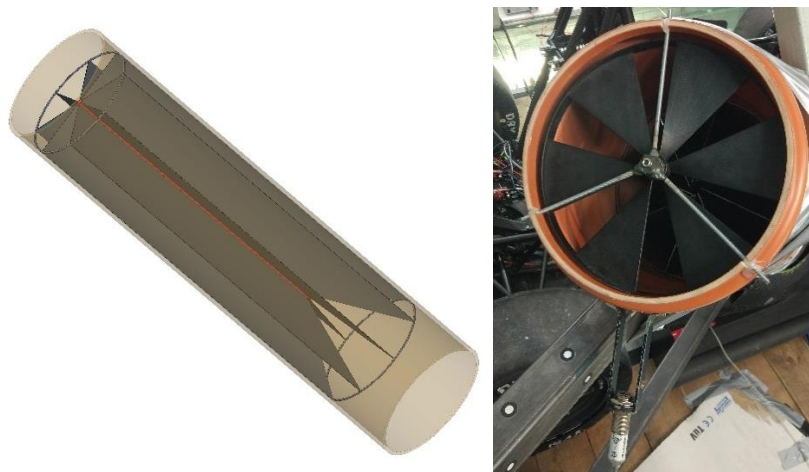
Měření průtoku přes chladič se uskutečnilo za podpory firmy Jaroš, která má větrný tunel umožňující měření do požadované rychlosti a odpovídající vybavení pro měření potřebných veličin tlaku, rychlosti proudění a otáček měřící vrtule.

#### 3.3.1 MĚŘÍCÍ VRTULE

Pro měření průtoku byla zvolena metoda měření průtoku měřící vrtulí. Je to nejrychlejší metoda umožňující rychlé měření s dobrými výsledky. Měřící vrtule se roztočí proudem vzduchu a otáčky vrtule budou snímány bezkontaktním optickým senzorem přes reflexní pásku umístěnou na rotoru vrtule. Druhá možnost je měření tlakového pole na vstupu do sidepodu a uvnitř sidepodu. Tento postup je příliš náročný časově a nebylo by možné změřit více variant s různými rychlostmi. Měření tlakového pole je možné jen v rovině kolmé na výstupní trysku tunelu. Naměřené pole by neodpovídalo vstupu do sidepodu, který je skloněný po směru jízdy.

#### KONSTRUKCE

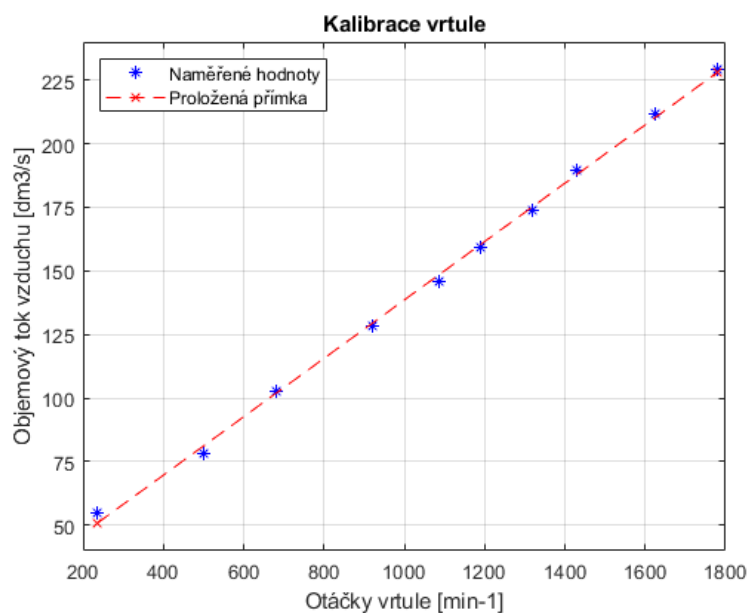
Pro měření průtoku přes chladič měřící vrtulí je potřeba vrtuli umístit za ventilátor a zabránit vstupu vířivého proudu vzduchu vystupujícího od ventilátoru. Součástí měřící sekce vrtule je trubka průměru 250 mm s vloženými plechy pro usměrnění rotujícího proudu vzduchu vystupujícího z ventilátoru. Na obrázku 31. je zobrazen model trubky s usměrňovacími plechy. Délka trubky je 1 000 mm s délkou plechů 800 mm.



Obrázek 31. CAD verze trubky s usměrňovačem, napravo uchycení vrtule se senzorem

#### KALIBRACE VRTULE

Vrtuli je nutné zkalibrovat pomocí jiného průtokoměru se známou charakteristikou. Kalibrace byla provedena pomocí kalibrační tratě s usměrňovačem proudění, ventilátorem a kalibračním průtokoměrem. Na obrázku 32. jsou uvedeny naměřené hodnoty proložené přímkou. Pomocí rovnice vzniklé přímkou budou převedeny otáčky vrtule na objemový průtok.



Obrázek 32. Kalibrace vrtule

### 3.3.2 MĚŘENÍ VE VĚTRNÉM TUNELU

Ve větrném tunelu je měření prováděno se stojící podlahou a neotáčejícími se koly. Vůz je umístěn na podlaze před ústím trysky výstupu vzduchu a zajištěn proti pohybu. Měřené hodnoty jsou rychlost proudícího vzduchu, otáčky měřicí vrtule a tlaky v sidepodu, před ventilátorem a za ventilátorem. Měřeno bylo pět variant zahrnujících vypnutí ventilátoru, náhrada axiálního ventilátoru SPAL střídavými bezkartáčovými motorky a tři varianty se zapnutým ventilátorem SPAL. První varianta byla testována shodně s podmínkami při provozu v sezóně, druhá varianta spočívala v ucpání prostoru kolem chladiče a poslední varianta byla měřena s vedením vzduchu ze vstupu sidepodu na chladič naváděcím elementem.



Obrázek 33. Dragon 8 ve větrném tunelu

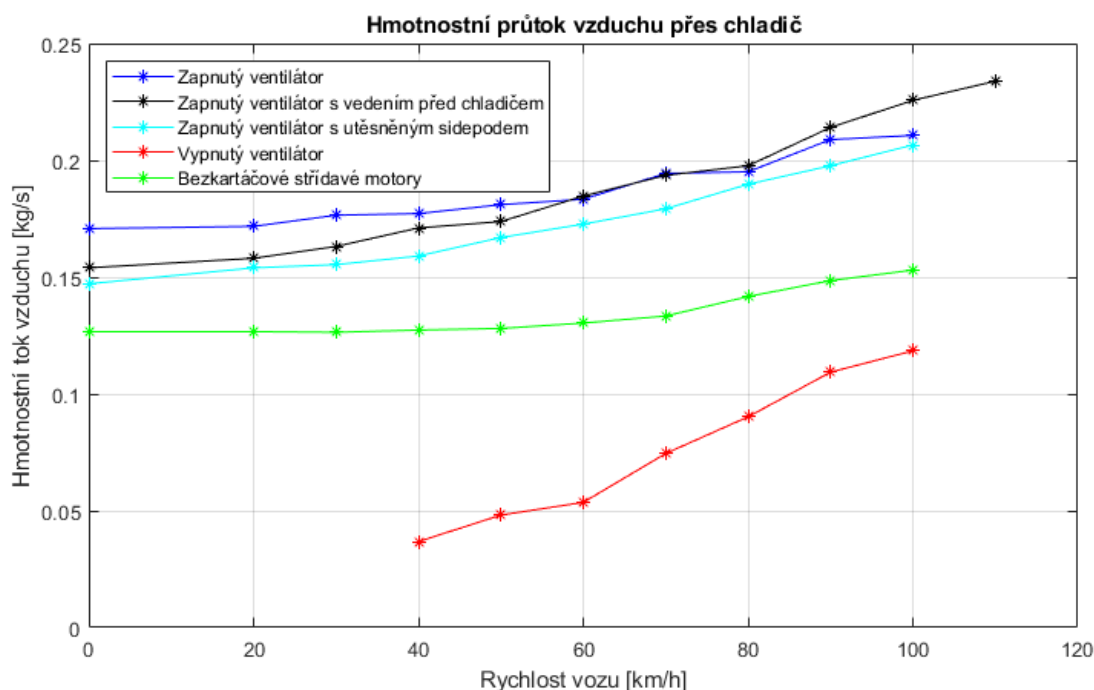


### 3.3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU

Výstupem měření je průtok přes chladič v závislosti na rychlosti proudění vozu a hodnoty tlaku v jednotlivých částech sidepodu a chladiče. Na obrázku 34. je zobrazen hmotnostní tok pro jednotlivé varianty.

#### VYPNUTÝ VENTILÁTOR

První měřená varianta byl stav bez utěsnění, nebo naváděče s vypnutým ventilátorem SPAL. Měření začínají na rychlosti 40 km/h, při menší rychlosti nedokázal nápor vzduchu roztočit měřicí vrtuli. Při zvyšování rychlosti dochází dále k nárůstu hmotnostního toku. Maximální hodnota měřená při 100 km/h nedosahuje odpovídajícího průtoku vzduchu při zapnutém ventilátoru v nulové rychlosti, je tedy neefektivní vypínat ventilátor ve vyšších rychlostech pro ušetření energie na ventilátoru.



Obrázek 34. Hmotnostní tok vzduchu přes chladič

#### BEZKARTÁČOVÉ STŘÍDAVÉ MOTORY

Druhou testovanou variantou je náhrada ventilátoru SPAL bezkartáčovými střídavými motorky. Na chladič jsou umístěny dva motory s třilistými vrtulemi, na obrázku 35. jsou motory umístěné na sahaře. Motory jsou řízeny pomocí elektronického rychlostní jednotky, která podle vstupního PWM signálu upraví rychlost otáčení motoru. Toto řízení umožňuje nastavení rychlosti rotace vrtule, které by pomohlo při řízení chlazení motoru a umožnilo snížit výkon ventilátoru při jízdě s nedostatečnou teplotou chladicí kapaliny. Motory byly řízeny na konstantní proudový odběr 5,3 A, stejný odběr s ventilátorem SPAL. Odběr je rozhodující vzhledem k výkonové bilanci dobíjecí soustavy s alternátorem s permanentními magnety a

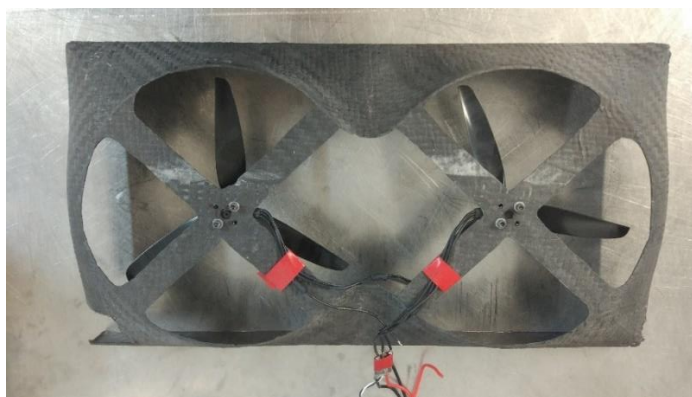




omezeným výkonem alternátoru. Motory je možné krátkodobě přetížít na maximální výkon při odběru 31,5 A. Tento proudový odběr není schopen poskytnout alternátor a docházelo by k vybíjení baterky, dále dochází k ohřevu řídicí jednotky motorů, která po krátkém čase sníží odebíraný výkon.

Při maximálním výkonu dosahovaly tyto motory dvojnásobného průtoku vzduchu při nulové rychlosti. Maximální výkon by mohl být využit při vysokých teplotách chladicí kapaliny pro nouzové stavy motoru. Malý nárůst průtoku se zvyšující se rychlostí může být způsoben řídicí jednotkou motorů řízením otáček na požadovanou hodnotu. Při nízké rychlosti odpovídá rychlost otáčení vrtule průtoku vzduchu a motor funguje ve správném režimu. Se zvyšující se rychlostí a zvyšujícím se dynamickým tlakem na chladiči roste průtok vzduchu, motor se snaží udržet konstantní otáčky a začíná brzdít proudění vzduchu přes chladič.

Bezkartáčové střídavé motory jsou lehčí než používaný ventilátor a umožňují řízení přímo z řídicí jednotky motoru. Při současné vyšší spotřebě a nižším průtoku přes chladič je nevýhodné jejich použití. Pro jejich použití je potřeba upravit tvar vrtule a řízení motoru pro zajištění lepší spotřeby a vyššího průtoku vzduchu.



Obrázek 35. Sahara s dvěma bezkartáčovými střídavými motory a řídicí jednotkou

### PROVOZNÍ VARIANTA DRAGONA 8

Poslední tři varianty byly měřeny se zapnutým ventilátorem SPAL a měněno bylo okolí chladiče a přívod vzduchu ke chladiči. První varianta tmavě modrá odpovídá provoznímu stavu bez utěsnění okolí chladiče a naváděcího elementu před chladičem. V nižších rychlostech je dosahován nejvyšší průtok vzduchu. S rostoucí rychlostí dochází k nárůstu průtoku přes chladič.

### ZAPNUTÝ VENTILÁTOR S NAVÁDĚČEM VZDUCHU

Varianta s naváděcím elementem se vyznačuje střední velikostí průtoku vzduchu v nízkých rychlostech. Tento rozdíl je způsoben recirkulací již nasátého vzduchu chladičem a jeho opětovný tok přes chladič. Recirkulace je nežádoucí vzhledem ke zvyšující se vstupní teplotě vzduchu proudícího přes chladič vedoucí k postupnému zvyšování teploty nasávaného vzduchu při stání, nebo pomalé jízdě vozu. Přidáním naváděcího elementu je zabráněno recirkulaci vzduchu přes chladič v nižších rychlostech, změna se dále projevuje ve vyšších rychlostech



zvýšením průtoku přes chladič lepším navedením vzduchu na chladič. Naváděč je na obrázku 36. umístěný na chladiči. Sidepod bude umístěný přes naváděč a utěsněný na vstupu pro dosažení maximálního využití náporu vzduchu.



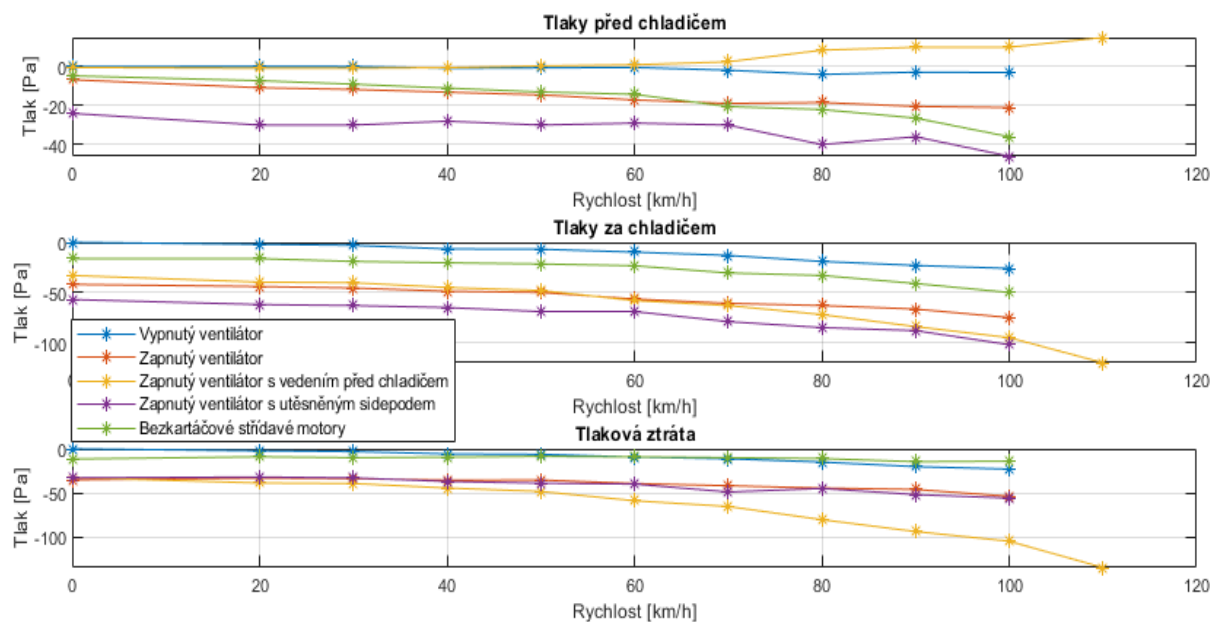
Obrázek 36. Naváděč před chladičem při měření v aerodynamickém tunelu

#### **ZAPNUTÝ VENTILÁTOR S UTĚSNĚNÝM PROSTOREM KOLEM CHLADIČE**

Poslední měřenou variantou je utěsnění prostoru v sidepodu kolem chladiče a mezi chladičem a monokokem. Utěsnění zamezí přísávání vzduchu ventilátorem kolem chladiče a eliminuje recirkulaci vzduchu. Utěsněním prostoru je zvýšeno škrcení na vstupu vzduchu do chladiče, je zde nejnižší tok vzduchu pro ventilátor SPAL. Při vyšších rychlostech dochází k nárůstu toku stejně s předchozími dvěma případy. Utěsnění není lepší než naváděč vzduchu v celém měřeném rozsahu. Oproti verzi bez utěsnění eliminuje recirkulaci vzduchu a umožní lepší chlazení při nižších rychlostech vozu.

#### **3.3.4 MĚŘENÍ TLAKU PŘED A ZA CHLADIČEM**

Při měření byly měřeny tlaky před a za chladiče. Umístění snímače je voleno s ohledem na vznik turbulentního proudění a ovlivnění proudem vzduchu v místě s očekávanou minimální rychlostí. Na obrázku 37. jsou vyneseny průběhy naměřených tlaků před chladičem a za chladičem. Z naměřených hodnot je vypočtena tlaková ztráta v Pa mezi měřenými body.



Obrázek 37. Naměřené tlaky a tlaková ztráta na chladiči

První varianta s vypnutým ventilátorem má specifický průběh tlaku před chladičem. Tlak jen minimálně roste s rychlostí, nedochází zde k výraznému zvýšení tlaku náporu vzduchu a chladič je obtékán proudícím vzduchem. Tlak za chladičem se postupně snižuje vlivem proudění vzduchu. Tlaková ztráta odpovídá nejmenšímu průtoku z měřených variant.

Druhá varianta se zapnutým ventilátorem při nulové rychlosti dosahuje vyššího průtoku vzduchu než varianta s vypnutým ventilátorem. Tlak před chladičem je záporný, ventilátor saje vzduch z prostoru sidepodu a jeho ústím. S rostoucí rychlostí klesá tlak před chladičem. Tlak za chladičem také klesá se zvyšující se rychlostí, tento pokles je způsoben zvýšením průtoku vzduchu přes chladič.

Třetí varianta s vedením vzduchu před chladičem využívá náporu vzduchu vyvolaným vyšší rychlostí. Tlak před chladičem roste, měření ukazuje dobrou funkci naváděče vzduchu, zvyšující průtok při vyšších rychlostech. Tlaková ztráta dosahuje nejvyšších hodnot, jelikož průtok byl nejvyšší z testovaných verzí.

Předposlední varianta s utěsněným sidepodem je význačná nízkou hodnotou tlaku před chladičem způsobenou zabráněním recirkulačního efektu, který zvyšoval průtok vzduchu při nízkých rychlostech. Ventilátor musel nasávat vzduch jen vstupem sidepodu, nikoliv kolem chladiče. Tento rozdíl tlaků je zachován v celém měřeném rozsahu. Tlaková ztráta je totožná s druhou variantou.

Poslední varianta s bezkartáčovými motory je specifická malou tlakovou ztrátou. Příčina tohoto stavu je popsána v předchozí kapitole. Naměřené hodnoty tlaku odpovídají snaze udržet otáčky vrtule a tím brzdí průtok přes chladič. Tlaková ztráta odpovídá ve vyšších rychlostech náporu vzduchu s vypnutým ventilátorem.



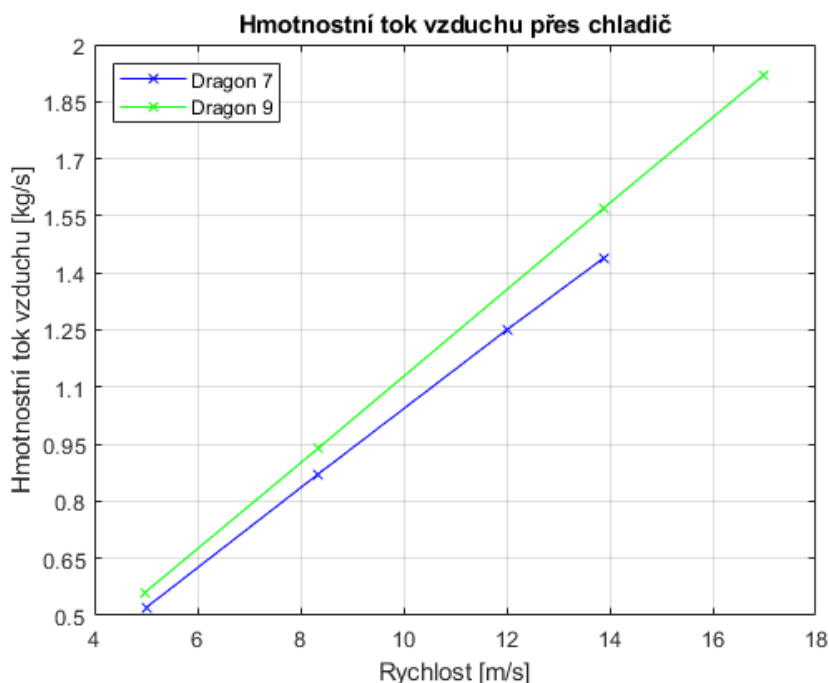


### 3.4 CHARAKTERISTIKY CHLADIČŮ

Charakteristiky chladičů jsou měřeny na měřicím stavu firmy Hanon Systems. Měření probíhá při konstantním průtoku vzduchu přes chladič a chladicí kapaliny. Pro měření jsou definovány okrajové podmínky vstupní rychlosti vzduchu a průtoku chladiva přes chladič. Z těchto podmínek vznikne matice bodů, ve kterých je chladič měřen. Regulované veličiny jsou průtoky vzduchu a chladiva, dále vstupní teploty médií. Měřenými hodnotami jsou výstupní teploty médií a tlaky před a za chladičem. Z naměřených hodnot je možné vypočítat tepelný výkon odvedený vzduchem a chladivem a tlakovou ztrátu.

Okrajové podmínky průtoku chladiva byly definovány na základě měření charakteristiky vodního čerpadla. Vybrané hodnoty 0,3, 0,5, 0,8 a 1,15 l/s odpovídají očekávanému průtoku chladičem při jízdě vozidla. Průtoky vzduchu byly stanoveny před měřeními ve větrném tunelu. Definována byla vstupní rychlost vzduchu 5, 8,33, 13,89 a 17 m/s. Tato rychlost odpovídá dosahovaným rychlostem vozidla při jízdě na závodních tratích. Při měření ve větrném tunelu byl změřen hmotnostní tok vzduchu přes chladič, který při maximální rychlosti dosahoval hodnot 0,21 kg/s. Nejnížší definovaná rychlost vzduchu 5 m/s odpovídá hmotnostnímu toku přes chladič 0,57 kg/s. Naměřená data je možné použít jen pro porovnání dvou testovaných chladičů.

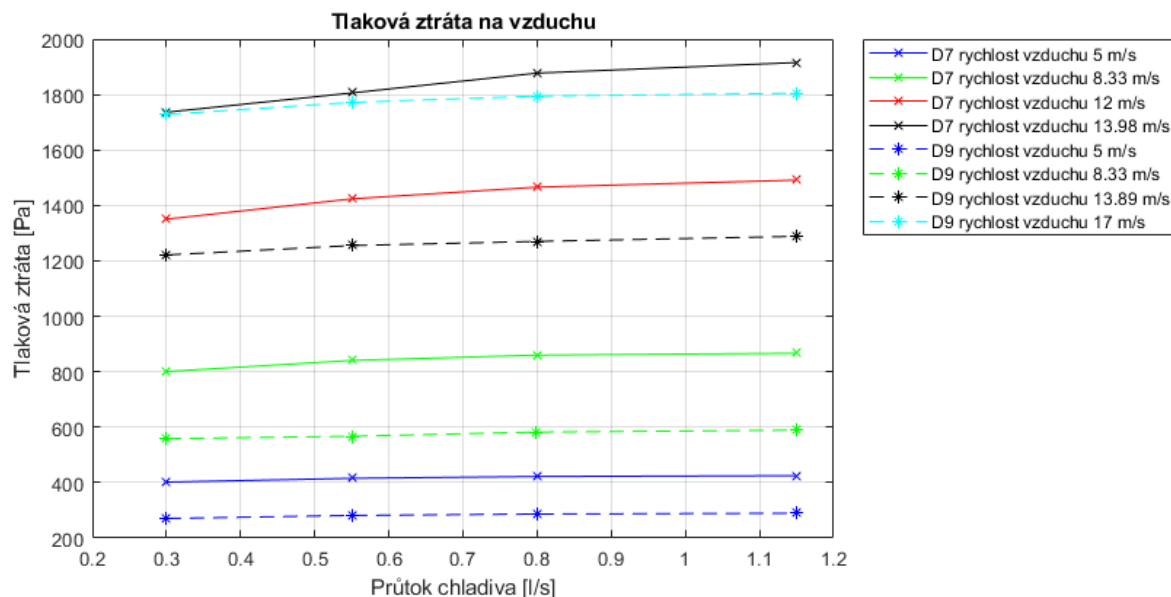
Pro testování byl zvolen chladič Dragona 7 a nový chladič na Dragona 9. Chladič Dragona 7 má konstrukčně shodné parametry jádra s chladičem Dragona 8. Při měření průtoku vody chladiči průtoky a tlakové ztráty mají minimální rozdíly. Chladič Dragona 9 má podobné rozměry s chladiči předchozích generací, změněná je hustota voštiny a tvar komor. Tyto změny by měla snížit tlakovou ztrátu a tím umožnit vyšší průtok vzduchu při nižších rychlostech. Úprava hustoty voštiny je patrná z obrázku 38. Hmotnostní tok vzduchu je vyšší u chladiče Dragona 9 oproti Dragonu 7 při stejné rychlosti.



Obrázek 38. Hmotnostní tok přes chladiče

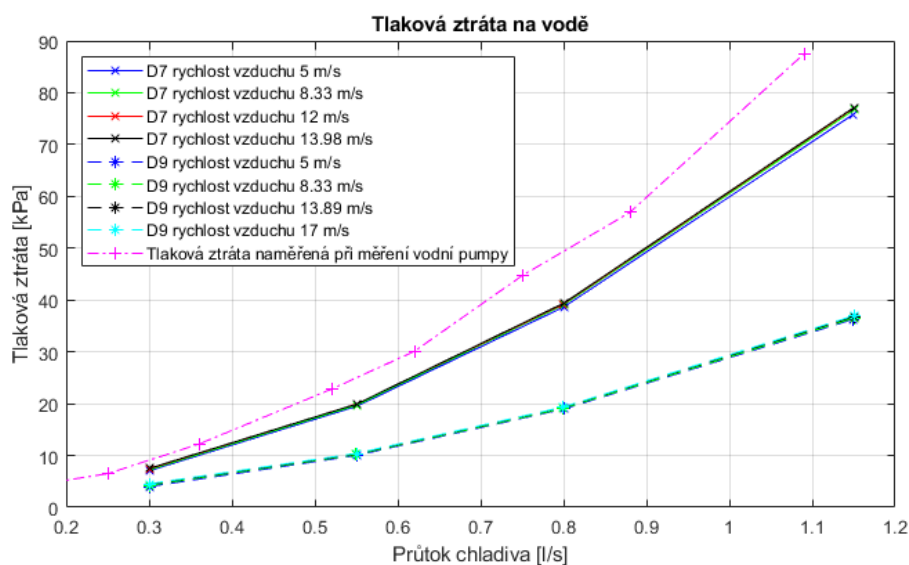


Na obrázku 39. je zobrazena tlaková ztráta pro jednotlivé rychlosti s měnícím se průtokem chladiva. Při vyšším průtoku chladiva dochází k ohřevu protékajícího vzduchu na vyšší teplotu a jeho následné expanzi. Rozdíl je patrný při vyšších rychlostech.



Obrázek 39. Tlaková ztráta při změně průtoku chladiva

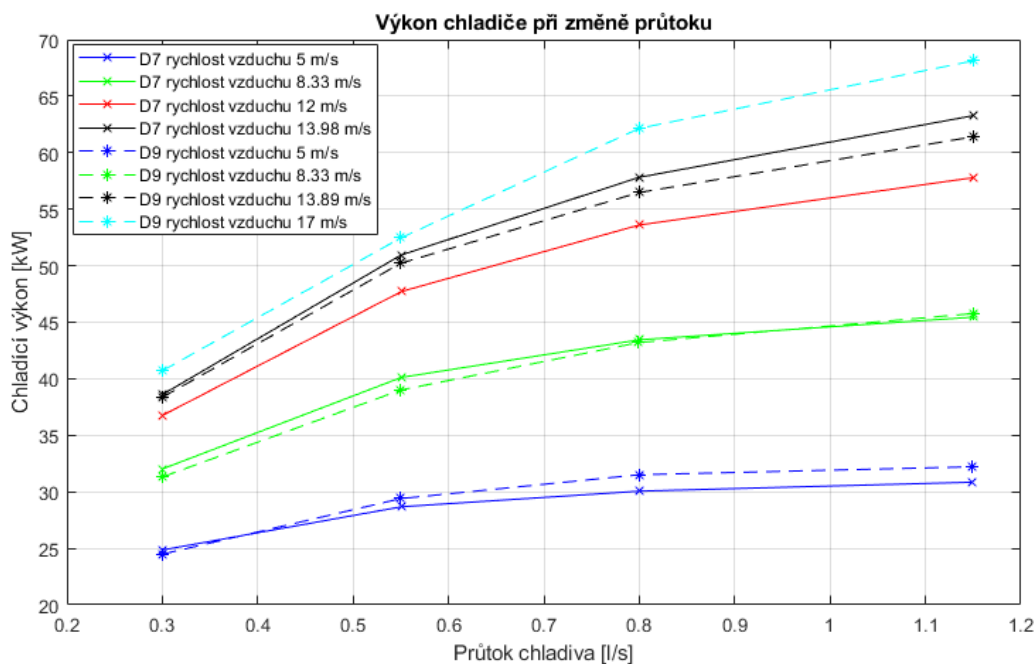
Tlaková ztráta na vodě je zobrazena na obrázku 40. Z naměřených hodnot je patrný rozdíl mezi Dragonem 7 a 9. Dragon 7 vykazuje vyšší tlakovou ztrátu při stejných průtocích, než Dragon 9. Rozdíl je způsoben úpravou komor chladiče, které jsou vyrobené pomocí 3D tisku a je dodržen navržený tvar oproti svařovaným komorám. Tato změna by měla pomoci při chlazení Dragona 9. Čerpadlo bude dodávat vyšší průtok při nižší tlakové ztrátě chladiče. Pro chladič Dragona 7 je také možné porovnat tlakovou ztrátu s měřením vodního čerpadla. Tlaková ztráta je z tohoto měření konstantně vyšší, tato odchylka může být způsobena nejistotou měření a změnou přívodu a odvodu kapaliny v hadicích.



Obrázek 40. Tlaková ztráta na vodě

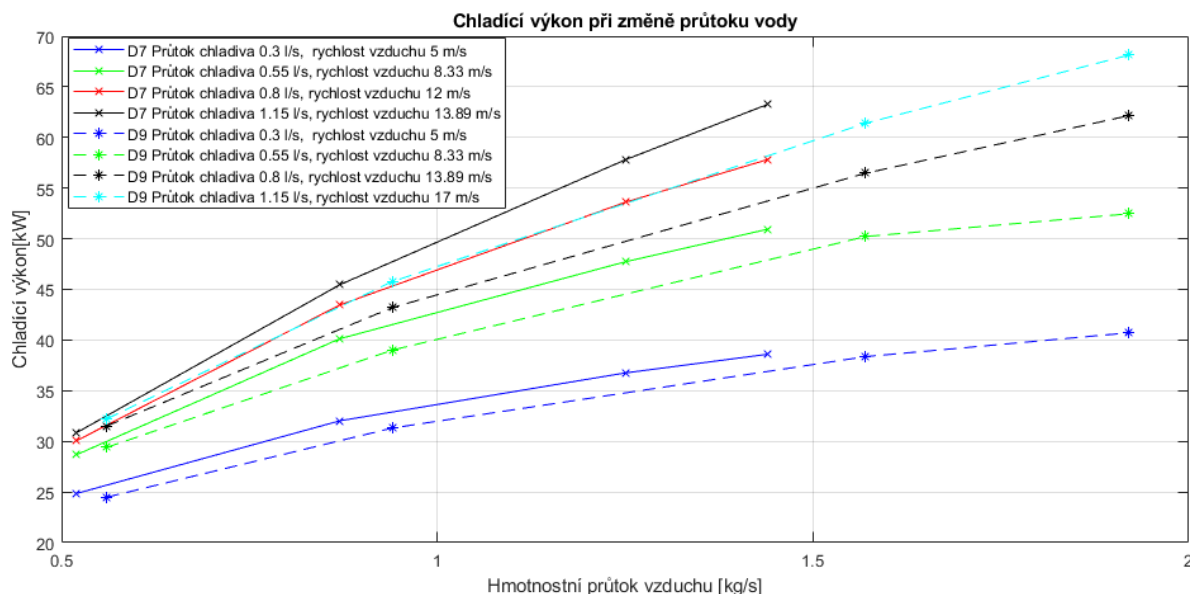


Chladicí výkon je vyneseno na obrázku 41. Pro každou vstupní rychlost je měněn průtok chladiva a vypočtena hodnota chladicího výkonu. Chladič Dragona 9 vykazuje vyšší chladicí výkon jen při nejnižší rychlosti. S narůstající rychlostí na 8.33 m/s se výkony vyrovnávají a při rychlosti 13.89 m/s již chladič Dragona 7 má vyšší chladicí výkon. Z průběhu naměřených hodnot je patrný malý vliv průtoku chladiva při nízké rychlosti. Při vyšších rychlostech nárůst průtoku chladiva výrazně ovlivňuje chladicí výkon.



Obrázek 41. Výkon chladiče při změně průtoku vody

Poslední zobrazený obrázek popisující charakteristiky výměníků zobrazuje chladicí výkon při změně průtoku vzduchu. Měřené hodnoty průtoku vzduchu násobně převyšují hodnoty skutečného průtoku vzduchu změřeného ve větrném tunelu. Měření je tedy možné použít pro porovnání jednotlivých chladičů, není možné z naměřených hodnot určit pracovní body chladičů. Výrazné jsou rozdíly v konstrukci jednotlivých chladičů vzhledem k vyššímu průtoku vzduchu pro jednotlivé body měření. V nižších rychlostech dosahuje chladič Dragona 9 vyšších chladicích výkonů, s rostoucí rychlostí je tento rozdíl vyrovnán a při nejvyšších rychlostech má nižší chladicí výkon. Tato ztráta je způsobena nedostatečným odvodem tepla voštinou chladiče, která se při nižších rychlostech neprojevuje vzhledem k vyššímu průtoku vzduchu voštinou.



Obrázek 42. Chladicí výkon při změně průtoku vzduchu

Změny v konstrukci mezi chladiči Dragona 7 a Dragona 9 jsou patrné při nižších rychlostech ve vyšším průtoku vzduchu a vyšším chladicím výkonu chladiče. Tato změna by měla pomoci chlazení a zvýšení průtoku vzduchu přes chladič při jízdě. Změna komor ze svařovaných na 3D tisknuté přinesla snížení tlakové ztráty na chladicím okruhu. Tato úprava zvýší hmotnostní tok chladičem a zvýší chladicí výkon chladič.

### 3.5 MĚŘENÍ NA VOZE

Měření na voze umožňuje porovnání statických měření s měřením při jízdě vozu. Cílem měření je ověřit předpoklady z předchozích kapitol a z naměřených hodnot vyvodit možné změny na chladicím okruhu, které přinesou zlepšení jeho funkce a umožní tak zrychlení celého vozu. Snížení hmotnosti chladicího systému a zmenšení momentu setrvačnostilepší jízdní dynamiku vozu při případném zmenšení chladiče a objemu chladicí kapaliny. Zvýšení chladicího výkonu umožní provozovat vůz ve vyšším zatížení po delší dobu a příznivě ovlivní životnost komponent motoru. Optimalizace proudění přes chladič povede ke snížení aerodynamického odporu a zlepšení práce s výstupním vzduchem ze sidepodu pro zlepšení účinnosti zadního křídla a difuzoru.

#### 3.5.1 MĚŘENÉ VELIČINY

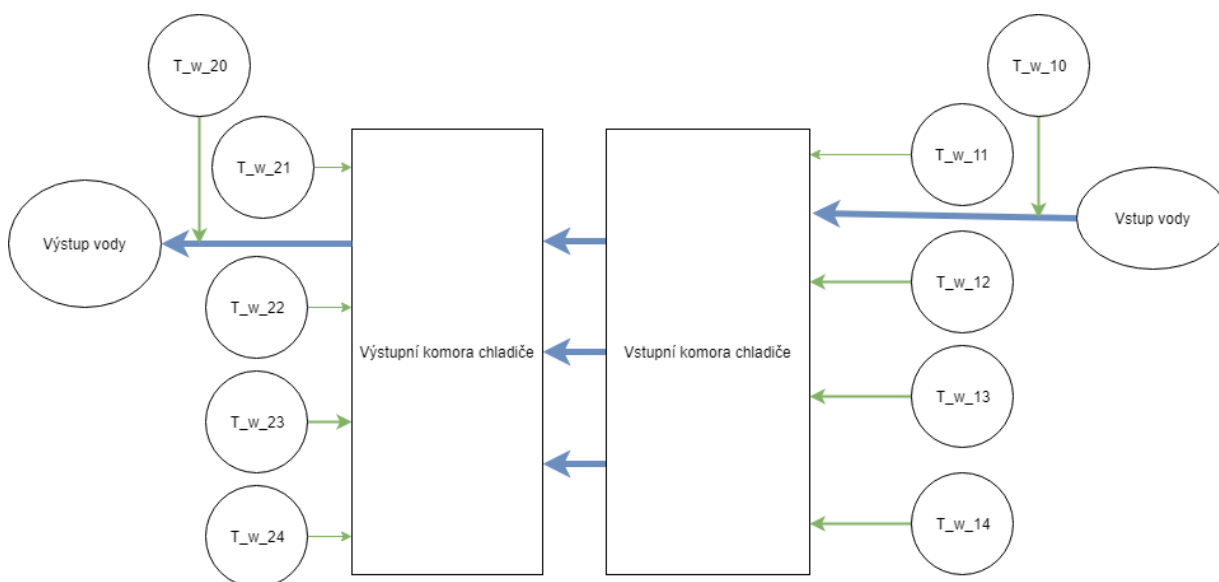
Měřené veličiny jsou z části shodné s předchozími měřeními. Měřen je průtok chladicím a mazacím okruhem, tlaky před a za chladiči, teploty vody na vstupu a výstupu z vodního chladiče, teplota vstupního a výstupního vzduchu a teplotní pole v komorách chladiče. Tyto měřené hodnoty je možné doplnit o hodnoty měřené na voze při jeho provozu. Jedná se o hodnoty teploty vody v hlavě motoru, teploty oleje v prostoru převodovky a tlaku oleje za chladičem. Měřené veličiny jsou seřazeny v tabulce 2. s jejich popisem.



Tabulka 2. Měřené veličiny

Název	Jednotka	Popis a umístění senzoru	Senzor
p_o_1	mbar	Tlak oleje na vstupu do chladiče	Tlakový 0-10 barů
p_o_2	mbar	Tlak oleje na výstupu z chladiče	Tlakový 0-10 barů
m_o	g/s	Hmotnostní tok oleje	Průtokoměr 1/25 l/min
p_w_1	mbar	Tlak vody na vstupu do chladiče	Tlakový 0-10 barů
p_w_2	mbar	Tlak vody na výstupu z chladiče	Tlakový 0-4 bary
m_w	l/s	Hmotnostní tok vody	Průtokoměr 4-160 l/min
T_w_0	°C	Teplota vody v hlavě	Termistor NTC
T_w_10	°C	Teplota vody na vstupu do chladiče	Termistor NTC
T_w_20	°C	Teplota vody na výstupu z chladiče	Termistor NTC
T_w_30	°C	Teplota vzduchu na vstupu	Termistor NTC
T_w_40	°C	Teplota vzduchu na výstupu	Termistor NTC

Schéma na obrázku 43. zobrazuje polohu měřících senzorů teploty v komorách chladiče.



Obrázek 43. Schéma pozic měření teploty vody

Všechny naměřené hodnoty jsou zpracovávány datalogerem Omega L2. Do datalogeru jsou přiváděny většinou analogové signály v rozsahu 0-5 V. Signál od senzoru je poté přes vyhledávací tabulku, nebo kalibrační rovnici převeden na výstupní hodnoty tlaku, nebo teploty.



Signál z průtokoměrů je schodovitěho charakteru, je snímána frekvence pulzů a frekvence je ukládána do výstupního souboru. Dataloger přímá po sběrnici CAN-BUS informace z řídicí jednotky a provádí jejich ukládání. Data jsou synchronizována a je možné jejich vyhodnocení.

### 3.5.2 MĚŘENÍ TEPLOTY OLEJE A VODY

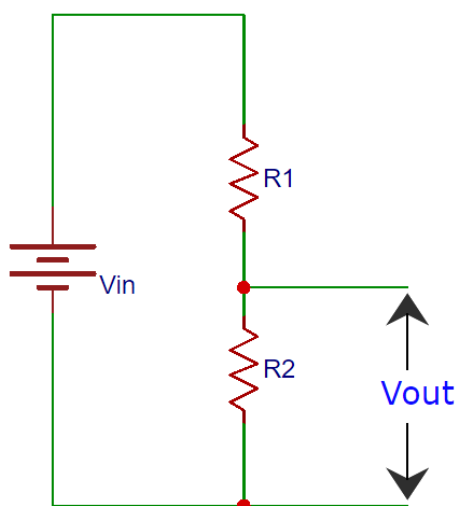
Teplota je měřena v rozsahu 20 až 120 °C. Je potřeba zvolit vhodný teplotní senzor, který bude možné instalovat na chladič a trubky chlazení, nebude zkreslovat měření a bude mít dostatečné rozlišení pro potřeby měření. Těmto požadavkům odpovídají polovodičové senzory označované jako termistory.

Termistor je polovodičová součástka reagující na změnu teploty změnou koncentrace nosičů náboje, tedy měřitelným odporem. Termistory dělíme podle materiálu na NTC (Negative Temperature Coefficient) a PTC (Positive Temperature Coefficient) podle změny odporu v závislosti na teplotě. PTC termistor zvyšuje svůj odpor s rostoucí teplotou, NTC termistor se chová obráceně. Změna odporu vzhledem k teplotě je nelineární. Mají malé rozměry, velkou citlivost na změnu teploty a jsou levnější než odporové senzory. [10]

Termistor je zapojen v obvodu sériově s rezistorem o známém odporu, který se s teplotou nemění. Zapojení je označované jako dělič napětí, schéma na obrázku 44. Při změně odporu jednoho rezistoru dochází ke změně výstupního napětí. Výstupní napětí je měřeno a zaznamenáváno. Rovnice 1. popisuje změnu výstupního napětí v závislosti na odporech a vstupním napětí. [11]

$$V_{out} = \frac{V_{in} * R_2}{R_1 + R_2}, [11] \quad (1)$$

$V_{out}$  je výstupní napětí, které je měřeno datalogerem vzhledem k nulové hodnotě napětí na záporném pólu baterie.  $V_{in}$  je vstupní napětí, kterým je obvod napájený, nejčastěji 5 nebo 12 V.  $R_1$  a  $R_2$  jsou hodnoty odporu rezistorů. [11]

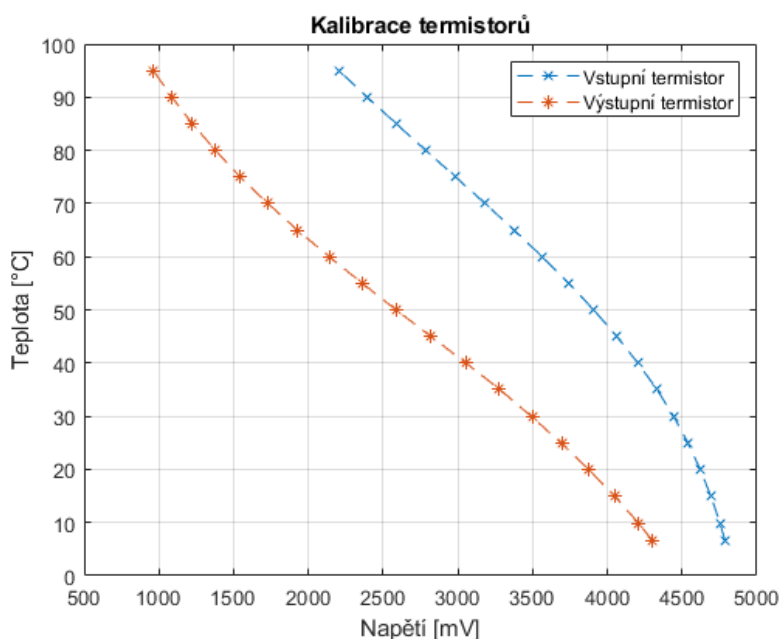


Obrázek 44. Dělič napětí [11]



### VOLBA PŘÍDAVNÉHO ODPORU TERMISTORU

Při použití termistoru je potřeba zvolit vhodně přídavný odpor, který mění charakteristiku výstupního napětí vzhledem k teplotě. Vhodnou volbou přídavného rezistoru je možné posunout využitelnou oblast termistoru do požadovaného rozsahu teplot, ve kterých bude termistor optimálně měřit. Změna charakteristiky je patrná z obrázku 44. Jsou zobrazeny změny teploty vzhledem k výstupnímu napětí. Charakteristika termistorů je volena podle měřicího rozsahu. Zobrazené senzory jsou použité při měření teploty vstupního a výstupního vzduchu na chladiči. Teplota vstupního vzduchu bude odpovídat teplotě okolního vzduchu při měření. Je tedy potřeba posunout rozsah senzoru k nižším teplotám. Při teplotách mezi 15 a 75 °C je dosaženo vhodné citlivosti na změnu teploty. Při vyšších teplotách dochází k malé změně napětí a zmenšení citlivosti na změnu teploty. Výstupní sensor teploty vzduchu má posunutou optimální oblast měření do vyšších hodnot změnou odporu z 20 kΩ na 3 kΩ. Vykazuje malou změnu napětí v nízkých teplotách pod 40 °C. Ve vyšších teplotách je jeho charakteristika téměř lineární.



Obrázek 45. Kalibrace termistorů

### KALIBRACE TERMISTORŮ

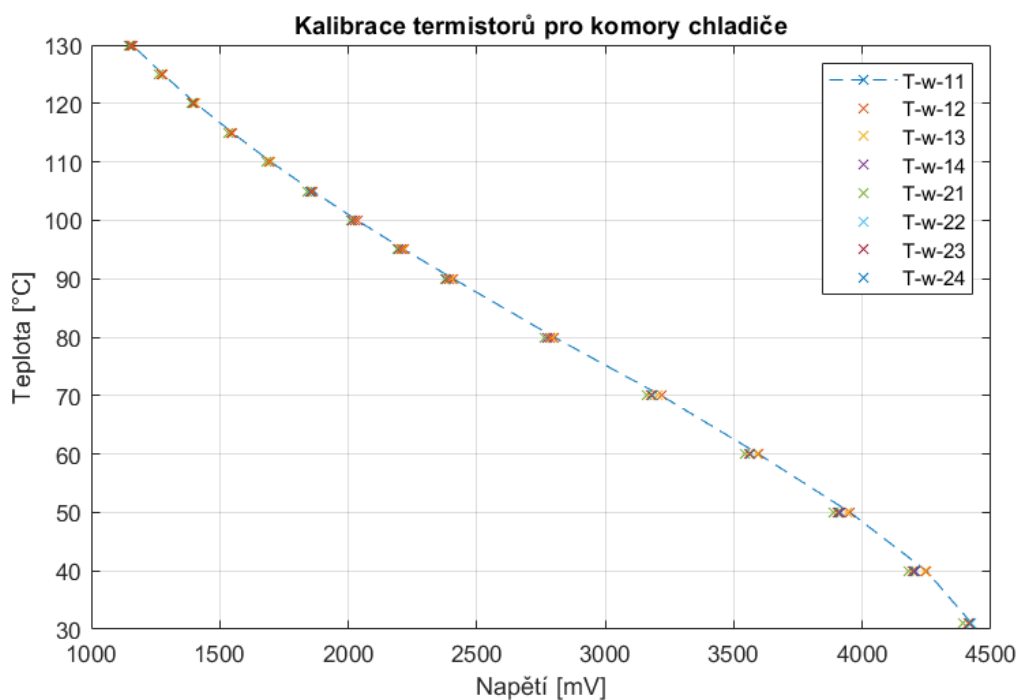
Každý termistor je kalibrován v kalibračním zařízení Julabo, které udržuje konstantní teplotu v nádobě s termistory. Teplota je udržována jen pomocí vyhřívání, nedokáže chladit. Teplota je měřena odporovými termistory Pt 100, které jsou součástí zařízení a regulátor nastavuje vyhřívání topné spirály na požadovanou teplotu. Při kalibraci je použit motorový olej, který umožní kalibraci až do 130 °C. Zařízení udržuje konstantní teplotu kapaliny, která je potřebná pro ustálení výstupního napětí a teploty termistorů.





Obrázek 46. Temperační jednotka Julabo

Termistory pro měření vodního a olejového okruhu byly kalibrovány v rozsahu teplot 30 až 130 °C. Při nižších teplotách po 10 °C, ve vyšších teplotách v očekávaném měřicím rozsahu po 5 °C. Kalibrace jsou zobrazeny na obrázku 46. Jedná se o termistory použité na komorách chladiče. Termistory vykazují vyšší odchylku v nižších teplotách. Tato odchylka je způsobena rozdíly mezi jednotlivými senzory dané výrobou. Při vyšší teplotě, ve které bude prováděno měření termistory vykazují minimální odchylky.



Obrázek 47. Kalibrace termistorů pro komory chladiče



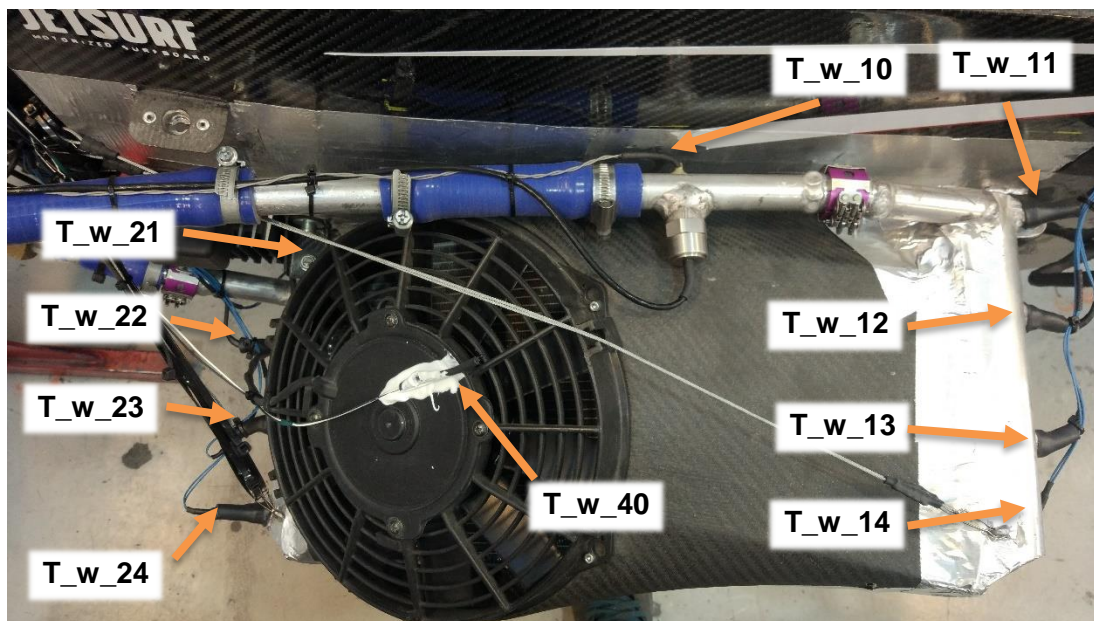
## INSTALACE TERMISTORŮ

Termistory jsou umístěny na vstupním a výstupním vedení ke chladiči a dále na vstupní a výstupní komoře. Termistory musí být v kontaktu s protékající vodou a nepropouštět kapalinu mimo okruh. Pro zajištění rychlé reakce na změnu teploty není termistor umístěn v ochranné dutině, přes kterou by teplo muselo přestupovat, ale zasahuje do proudu kapaliny. Termistory na komorách jsou vlepené do vrtaných šroubů, které jsou upevněny na chladič přes navařené osazení s průchozí dírou do komory chladiče. Je dosaženo přímého kontaktu termistoru s kapalinou a spoj je těsněný na měděné podložce pod hlavou šroubu a lepidle, kterým je termistor utěsněn a držen ve šroubu. Na obrázku 48. jsou zobrazeny hotové senzory s kabeláží a konektory pro připojení k datalogeru.



Obrázek 48. Připravené teplotní senzory pro komory chladiče

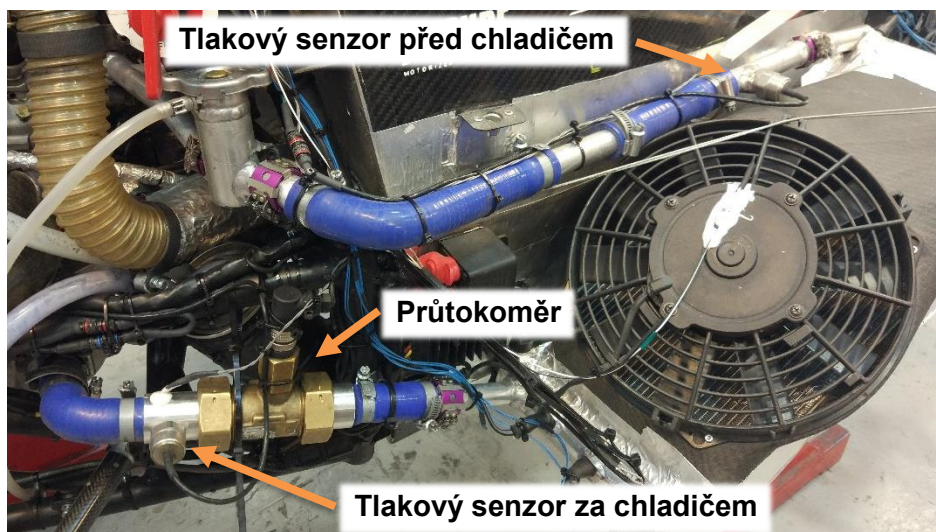
Teplotní senzory jsou umístěné na chladiči. Poloha senzorů je kompromis pro dosažení rovnoměrného rozmístění senzorů a zástavbových možností na voze. Senzory jsou po instalaci a zkoušce těsnosti chráněny smršťovací bužírkou proti mechanickému poškození. Na obrázku 49. je chladič s instalovanými teplotními senzory.



Obrázek 49. Instalace teplotních senzorů

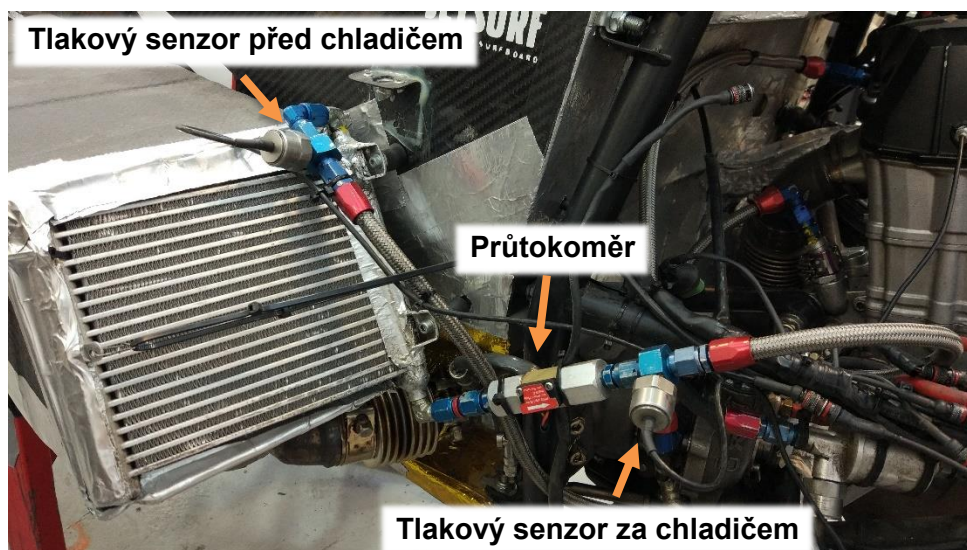
### 3.5.3 MĚŘENÍ PRŮTOKU A TLAKU

Měření průtoku a tlaku je podobné s měřením charakteristik čerpadel. Jsou použité stejné axiální průtokoměry umístěné před sáním vodního čerpadla a na výstupu z olejového chladiče. Tlakové senzory jsou umístěné před chladiči a za chladiči. Umístění průtokoměru a tlakových senzorů použitých na vodním okruhu je zobrazeno na obrázku 50.



Obrázek 50. Umístění tlakových senzorů a průtokoměru na vodním okruhu

Na obrázku 51. je zobrazeno umístění tlakových senzorů a průtokoměru na mazacím okruhu. Teplota oleje nebyla měřena z důvodu nedostatku analogových vstupů na datalogeru nebo řídicí jednotce motoru.



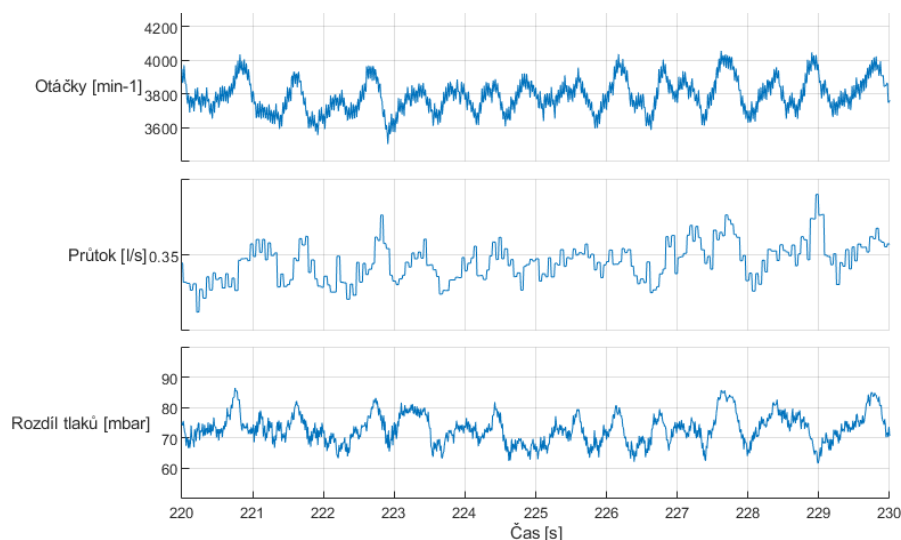
Obrázek 51. Umístění tlakových senzorů a průtokoměru na mazacím okruhu





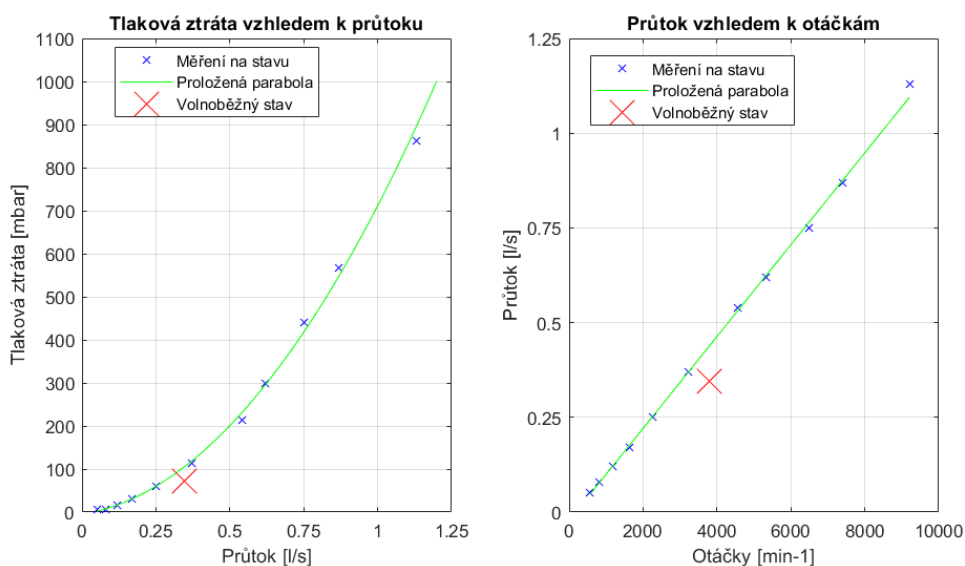
### 3.5.4 USTÁLENÝ STAV CHLADÍČÍ OKRUH

Ustálený stav je uváděn pro porovnání průtoku a tlakové ztráty na chladiči při běhu motoru. Motor dosahuje ustálených otáček pouze ve stavu volnoběhu. Vzhledem k velikosti testovací plochy není možné provést měření při vyšších otáčkách po delší časový úsek. Na obrázku 52. jsou zobrazeny otáčky motoru, objemový průtok vody a tlaková ztráta na chladiči.



Obrázek 52. Záznam z volnoběžného stavu

Na horním grafu obrázku 52. jsou zobrazeny otáčky motoru. Volnoběh není ideálním ustáleným stavem, jedná se o stav, kterého je možno dosáhnout po delší dobu s malou změnou otáček. Průměrné otáčky dosahují hodnot 3 791 min<sup>-1</sup>. Druhý graf zobrazuje objemový tok vodním okruhem. Průtok se mění s otáčkami a celý systém má dobrou časovou odezvu na změnu otáček čerpadla. Průměrný objemový tok je 0.345 l/s. Poslední graf zobrazuje tlakovou ztrátu na chladiči vypočtenou odečtením tlaku za chladičem od tlaku za chladičem. Do této hodnoty je zahrnuta tlaková ztráta průtokoměru a vedení před a za chladičem. Průměrná hodnota tlakové ztráty činí 73 mbar.



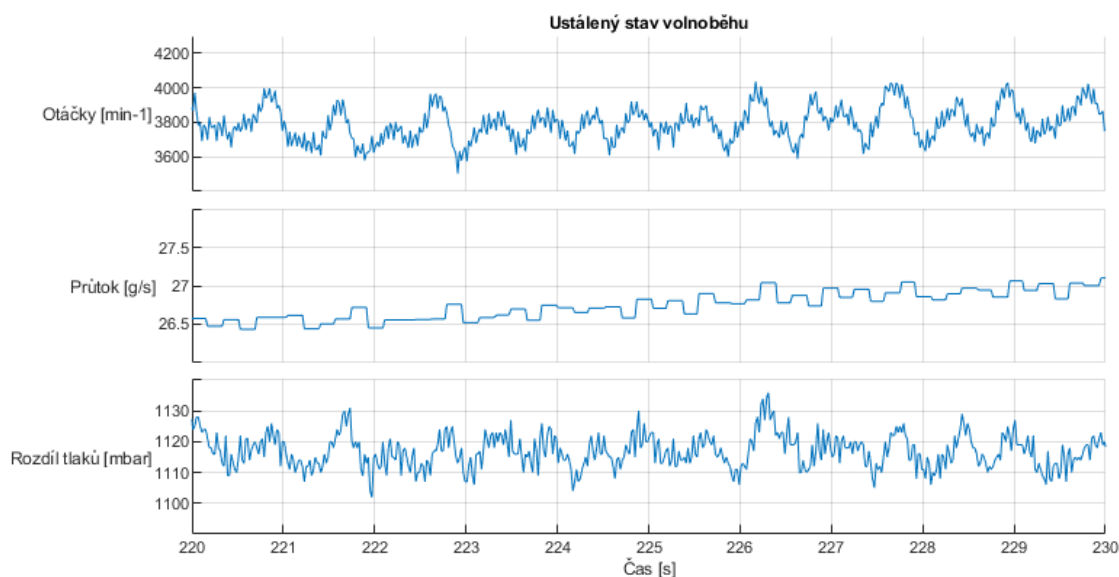
Obrázek 53. Porovnání naměřených charakteristik čerpadla s měřením na voze



Na obrázku 53. jsou zobrazeny dva grafy závislosti tlakové ztráty na průtoku a průtoku na otáčkách motoru. Modrými křížky jsou znázorněny naměřené hodnoty na měřicím stavu s chladičem Dragona 8. Zelenou křivkou je znázorněno proložení bodů parabolou pro tlakovou ztrátu a přímkou pro průtok. Červeným křížkem je vyznačena průměrná hodnota pocházející z měření na voze při volnoběhu. Naměřené hodnoty tlakové ztráty i průtoku neodpovídají hodnotám z měření vodní pumpy. Tento rozdíl může být způsoben změnou ve vedení vodního okruhu na voze, chlazením turbodmychadla a nerovnoměrností chodu motoru.

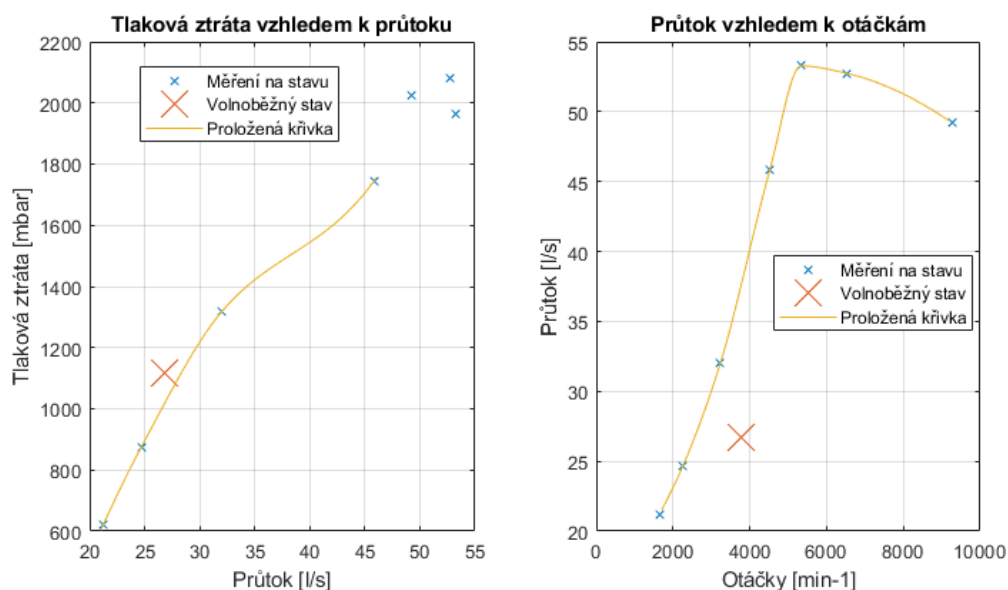
### 3.5.5 USTÁLENÝ STAV MAZACÍ OKRUH

Obdobně s chladičím okruhem je popsán ustálený stav pro mazací okruh. Na obrázku 54. je zobrazen graf s otáčkami motoru, průtokem oleje v g/s a tlakovou ztrátou v mbar. Časový úsek je vybrán shodně s ustáleným stavem pro vodní okruh. Průtok oleje má rostoucí trend, tento nárůst je způsoben postupným ohříváním oleje a snižováním jeho odporu při proudění olejovým chladičem, kanály v motoru a hadicemi. Průtokoměr zobrazuje průtok ustálenější oproti vodnímu okruhu. Tento rozdíl může být způsoben větší setrvačností okruhu oproti vodnímu okruhu a tím menší změnou vzhledem ke změně otáček motoru. Tlaková ztráta na olejovém chladiči se mění s otáčkami motoru, změna je řádech 20 mbar.



Obrázek 54. Záznam z volnoběžného stavu pro mazací okruh

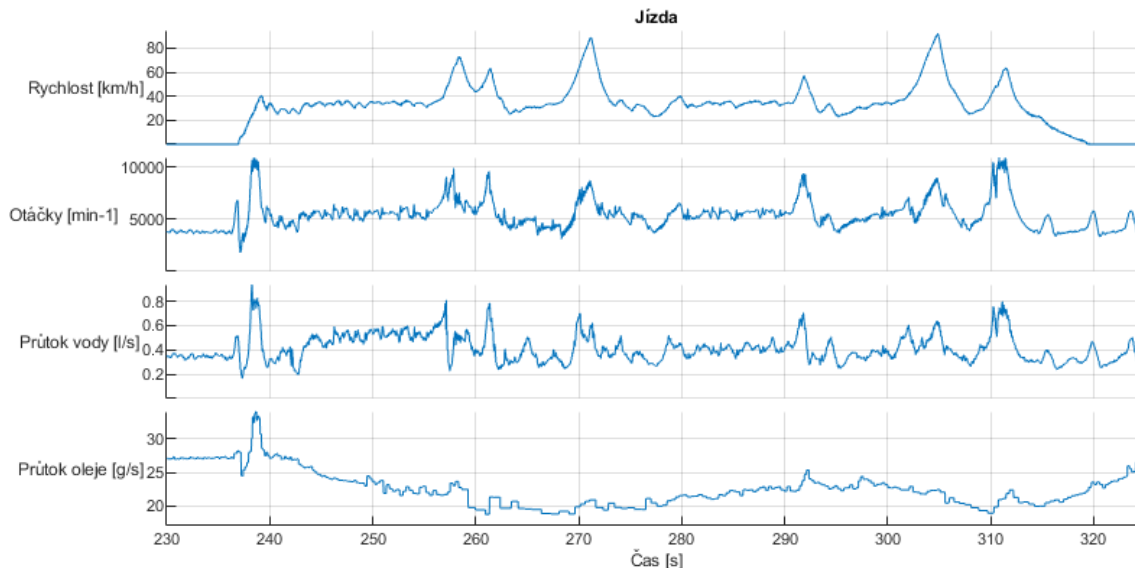
Na obrázku 55. je zobrazeno porovnání tlakové ztráty při průtoku oleje a průtoku oleje s otáčkami. Tlaková ztráta odpovídá měření na měřicím stavu. Rozdíl může být způsoben odlišnou viskozitou oleje a způsobem proložení křivky mezi dvěma body. Průtok neodpovídá otáčkám motoru podle statického měření. Problémem je tlaková ztráta dále ve vedení oleje, kdy olej jde přes olejový filtr do mazacích kanálů v motoru a odtud k tryskám a ložiskům. Tato přídatná tlaková ztráta snižuje průtok dodávaný čerpadlem.



Obrázek 55. Porovnání průtoku a tlakové ztráty při měření na voze se statickými charakteristikami

### 3.5.6 DYNAMICKÝ STAV CHLADÍČÍ A MAZACÍ OKRUH

Dynamickým stavem je stav vozu při jízdě. Dochází k prudké akceleraci a brždění vozu. Tyto změny rychlosti jsou doprovázené změnami otáček motoru a změnou rychlosti proudění vzduchu přes chladiče. Na obrázku 56. je uveden záznam z jízdy vozu s vybranými parametry.



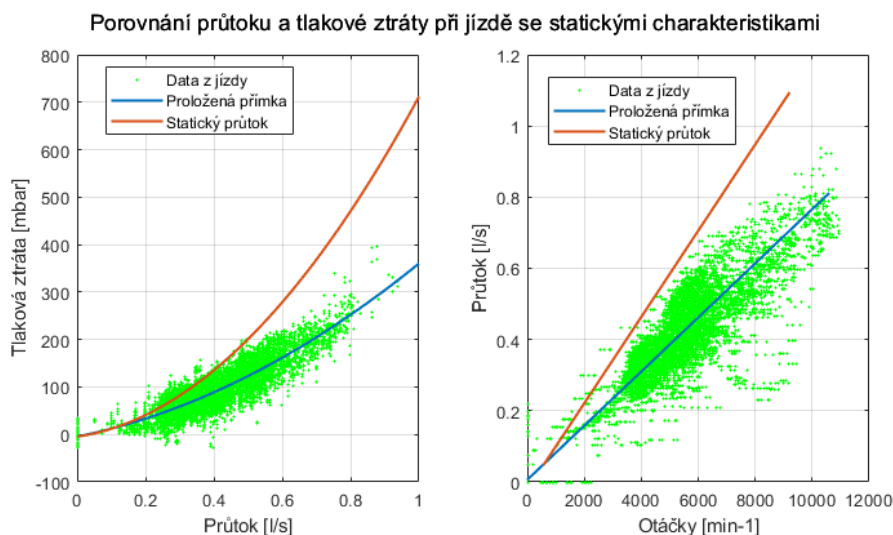
Obrázek 56. Záznam z jízdy

Je zobrazena rychlost vozu v km/s, otáčky motoru v min<sup>-1</sup>, průtok vody v l/s a průtok oleje v g/s. Při záznamu vozidlo zrychlilo a jelo po testovací trati. Průtok vody kopíruje otáčky motoru, průtok oleje reaguje na otáčky motoru jen při rozjezdu. Při jízdě dochází k častému odlévání oleje od sacího koše čerpadla, proto při průjezdech zatáčkami dosahují průtoky výrazně nižších hodnot vzhledem k volnoběžnému stavu. Odlévání je velkým problémem motoru použitého z motorky ve dvoustopých vozech. V motoru jsou vytvořeny přepážky pro udržení oleje u sacího koše, ale i tak dochází k odlévání.



## PRŮTOK A TLAKOVÁ ZTRÁTA NA VODNÍM OKRUHU

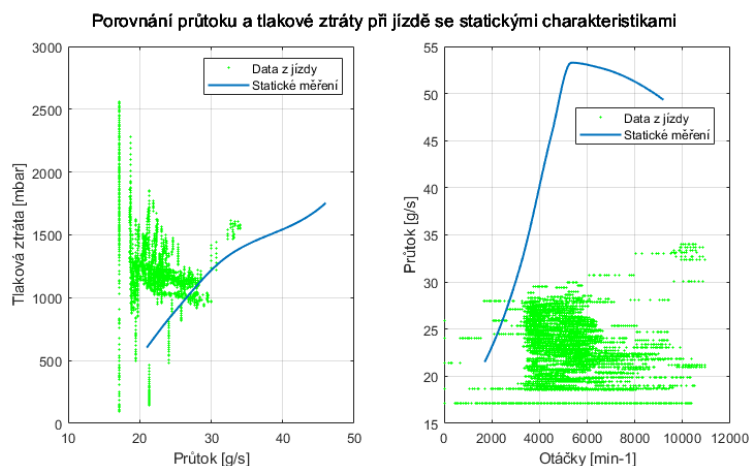
Ze záznamu z jízdy jsou vyneseny průtoky chladícím okruhem vzhledem k otáčkám a tlaková ztráta chladiče vzhledem k průtoku. Naměřené hodnoty tlakové ztráty jsou výrazně nižší než naměřené hodnoty za jízdy. Průtok vodním okruhem je také nižší než průtok při statickém měření. Tato odchylka může být způsobena zrychlováním a zpomalováním čerpadla, které vede k změnám průtoku. Dynamická změna průtoku vede k odporu vody ve vedení a ten se projeví vyšším tlakem na výstupu z čerpadla.



Obrázek 57. Porovnání stacionárního a dynamického stavu

## PRŮTOK A TLAKOVÁ ZTRÁTA NA OLEJOVÉM OKRUHU

Na obrázku 58. je zobrazen tlaková ztráta vzhledem k průtoku a průtok vzhledem k otáčkám motoru. Naměřené hodnoty tlakové ztráty neodpovídají očekávanému průběhu ze statického měření. Tento rozdíl je patrný také z měření průtoku, průtok nepřesahuje 30 g/s ani při vyšších otáčkách. Malá hodnota průtoku je způsobena odléváním oleje, které snižuje nasáté množství oleje. Odchylka je způsobena změnou viskozity oleje, při měření byl měřen olej s pokojovou teplotou. Na grafech je také patrná minimální hodnota průtoku, která je dána převodní funkcí průtokoměru, který není schopen měřit velmi malé průtoky.



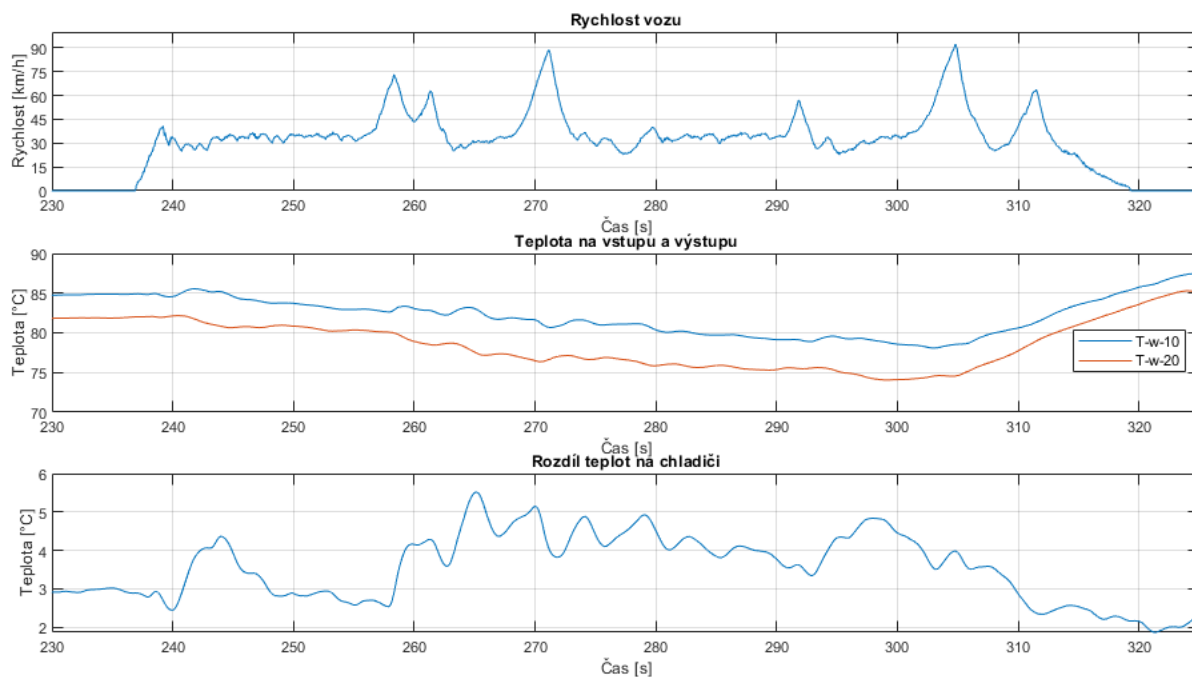
Obrázek 58. Porovnání stacionárního a dynamického stavu olejového okruhu





### 3.5.7 PRŮBĚH TEPLOT NA VSTUPU A VÝSTUPU VODY Z CHLADIČE

Teplota na vstupu a výstupu z chladiče je měřená dvěma teplotními senzory umístěnými ve vstupním a výstupním vedení. Označení teplot odpovídá obrázku 43., teplota na vstupu do chladiče je značena  $T_{w\_10}$  a teplota na výstupu z chladiče je značena  $T_{w\_20}$ . Na obrázku 59. je vyneseno průběh teplot během jízdy a rychlost vozu. Na spodním grafu je vyneseno rozdílné teplot vypočtené odečtením výstupní teploty od vstupní teploty.



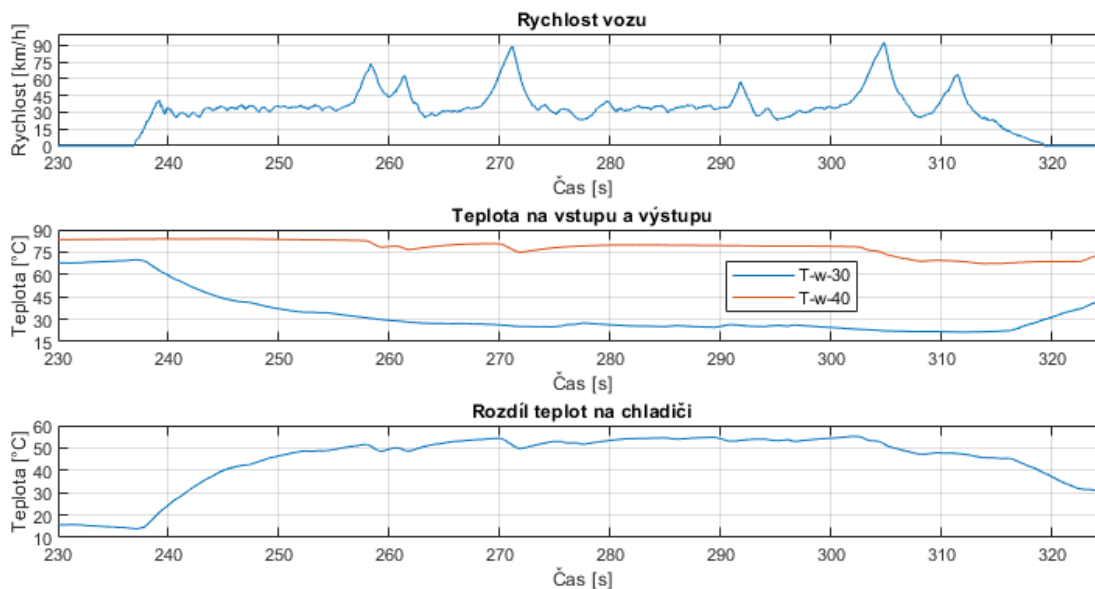
Obrázek 59. Teploty na vstupu a výstupu z chladiče

Rozdíl teplot na chladiči je řízen průtokem vzduchu přes chladič. Vzduch proudí i při nulové rychlosti pomocí ventilátoru, který se stará o zajištění velké části průtoku vzduchu při jízdě. Rozdíl teplot roste s nutností chladit vyšší výkon motoru při jízdě a zvýšením průtoku vzduchu ve vyšších rychlostech. Na konci záznamu je patrný pokles rozdílu teplot. Tento pokles je způsoben vypnutím ventilátoru v čase 302 s a zpomalováním vozu. Je zřejmé, že ventilátor má velký vliv na chlazení a bez jeho správné funkce není možné provozovat vůz delší dobu. Naměřená hodnota rozdílu teplot bude využita dále pro stanovení tepelného výkonu chladiče.



### 3.5.8 ROZDÍL TEPLOT NA VSTUPU A VÝSTUPU VZDUCHU Z CHLADIČE

Teplota je měřena ve vstupu sidepodu a za ventilátorem. Na obrázku 60. je vynesena rychlost vozu, teploty na vstupu a výstupu a rozdíl teplot. Teplota vstupního vzduchu je označena  $T_{w\_30}$  a teplota výstupního vzduchu je označena  $T_{w\_40}$ .

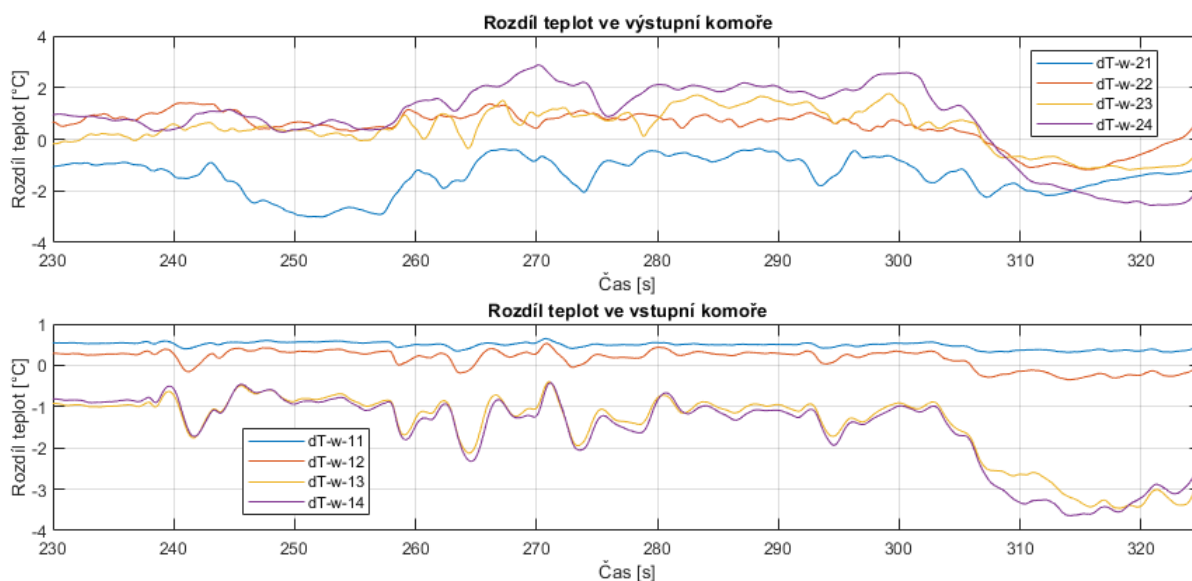


Obrázek 60. Průběh teplot na vstupu a výstupu z chladiče s rozdílem teplot

Vstupní teplota vzduchu na začátku záznamu potvrzuje předchozí zjištění recirkulace vzduchu přes chladič. Teplota při zapnutí ventilátoru dosahuje 70 °C při volnoběhu, nulové rychlosti a okolní teplotě 21 °C. Vzduch je dobře odváděn s dosažením vyšší rychlosti. K recirkulaci dochází tedy i při vyšších rychlostech. Výstupní teplota dosahuje hodnot 84 °C s klesajícím trendem. Pokles teploty je patrný také při konci záznamu vypnutím ventilátoru v čase 302 s a zvyšováním vstupní teploty. Zvýšení vstupní teploty je způsobeno ohříváním prostoru sidepodu a tím i vzduchu na vstupu. Rozdíl teplot se po krátkém čase ustálí na rozdílu teploty přes 50 °C, s poklesem teploty v závěru způsobeným vypnutím ventilátoru.

### 3.5.9 PRŮBĚH TEPLOT V CHLADIČI

V komorách chladiče je měřena teplota, od které je odečtená teplota měřená ve vstupní trubce pro vstupní komoru a pro výstupní komoru je teplota ve výstupní trubce odečtená od teploty ve výstupní komoře. Na obrázku 61. je zobrazen průběh rozdílu teplot ve vstupní a výstupní komoře. Kladná hodnota značí vyšší teplotu vzhledem k vstupní nebo výstupní teplotě. Záporná teplota znamená nižší teplotu v měřeném místě. Systém značení vychází z pojmenování teplotních senzorů. Číslem jedna je označeno umístění senzoru blíže vstupu nebo výstupu, číslem čtyři je označena teplota nejdále od vstupu nebo výstupu. Teploty na vstupní komoře začínají číslem jedna, teploty na výstupní komoře jsou označovány číslem dva.



Obrázek 61. Rozdíl teplot v komorách chladiče

Z obrázku 61. je patrný rozdíl v měřených teplotách ve vstupní komoře. Teplota 11 dosahuje mírně vyšších hodnot než vstupní teplota. Tato odchylka může být způsobena nejistotou měření. Teplota 12 odpovídá teplotě na vstupu do chladiče, je zde zajištěn dobrý průtok kapaliny. Teploty 13 a 14 mají po celou dobu záznamu shodný průběh i hodnoty. Jsou umístěny nejdále od vstupu chladicí kapaliny. Dochází zde již ke ochlazení, které je patrné ze změny teploty vzhledem ke vstupní teplotě. Vysoký rozdíl teplot nastává od času 305 s, kdy vozidlo dvakrát akcelerovalo na vysokou rychlost, zvýšil se průtok chladičem a kapalina byla více ochlazována. Teploty ve vstupní komoře nabývají očekávaných hodnot. Z naměřeného rozdílu teplot není patrné špatné rozložení průtoku chladičem, které by výrazně ovlivnilo tepoty.

Teploty ve výstupní komoře vykazují symetričtější rozložení vzhledem k výstupní teplotě. Teplota 21 je konstantně nižší než výstupní teplota. Tento rozdíl může být způsoben vyšším tokem vzduchu způsobeného tvarováním sidepodu, kdy vzduch více proudí kolem monokoku a méně na straně sidepodu. Vyšší průtok vzduchu by umožnil větší odvod tepla z jádra chladiče a tím nižší teplotu blíže výstupu z komory. Čím dále tedy měříme teplotu na výstupní komoře roste rozdíl teplot. Nejvyšší rozdíl teplot je naměřen na nejvzdálenějším senzoru 24. Rozdíl teplot na posledních 25 sekundách je způsoben nižší vstupní teplotou, která se projeví také na výstupní komoře.

### 3.5.10 TEPELNÝ VÝKON CHLADIČŮ

Tepelný výkon chladiče je možné vypočítat pomocí změřených hodnot z rovnice 2.  $P$  značí výkon ve watttech,  $\dot{m}$  je hmotnostní tok v kg/s,  $\Delta T$  je rozdíl teplot v °C a  $c$  je měrná tepelná kapacita v J\*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>. [12]

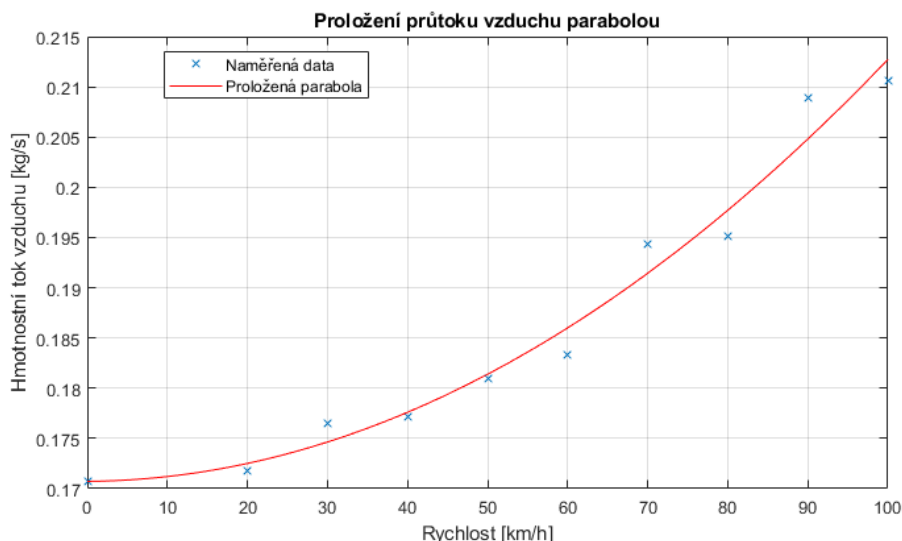
$$P = \dot{m} * \Delta T * c, [12] \quad (2)$$

Hmotnostní tok  $\dot{m}$  není přímo měřen průtokoměrem, je potřeba jej vypočítat z objemového toku. Objemový tok  $\dot{V}$  je vynásoben hustotou kapaliny  $\rho$  podle rovnice 3. Hustota je zvolena 987 kg/m<sup>3</sup> podle průměrné teploty vody. [13]



$$\dot{m} = \dot{V} * \rho, \quad (3)$$

Pro hmotnostní tok vzduchu je použito proložení naměřených bodů parabolou, ze které je pomocí kvadratické rovnice s koeficienty paraboly vypočten hmotnostní průtok odpovídající rychlosti vozu. Použitá parabola je znázorněna na obrázku 62.



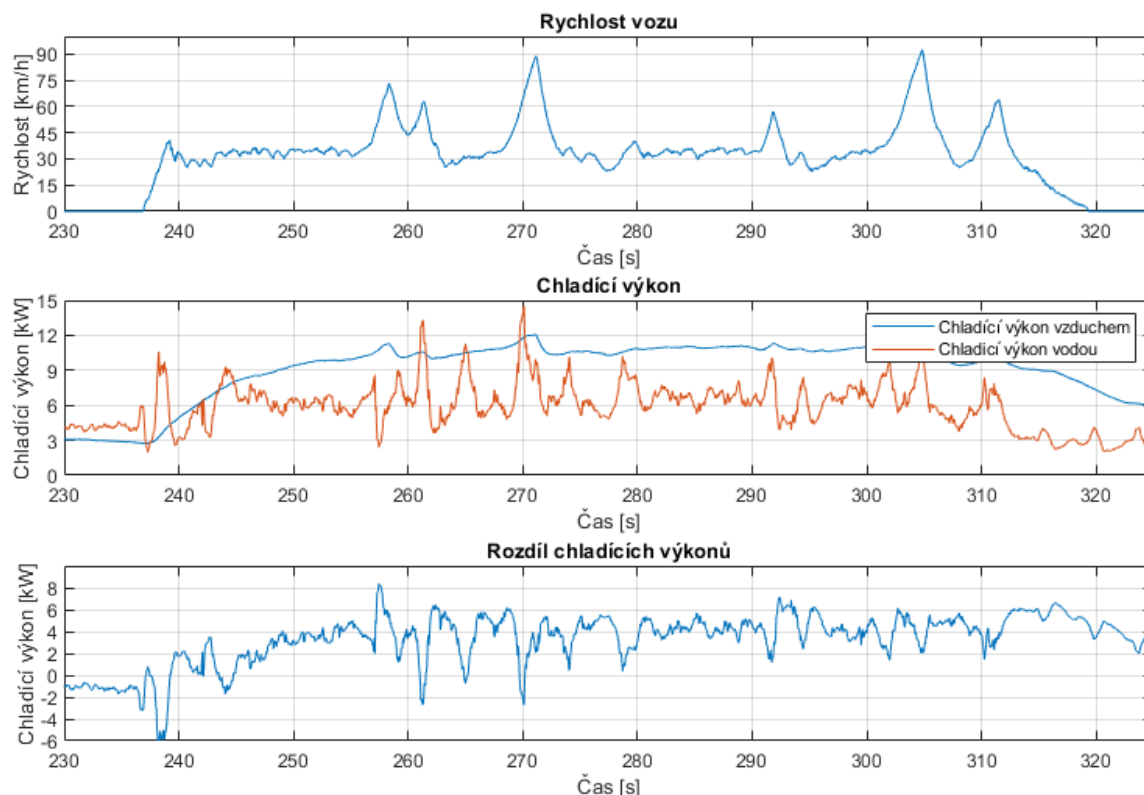
Obrázek 62. Proložení průtoku vzduchu chladičem parabolou

Měrná tepelná kapacita je pro vodu  $4,198 \text{ kJ} * \text{kg}^{-1} * \text{K}^{-1}$  podle průměrné teploty vody  $85^\circ \text{C}$  a pro vzduch  $1,015 \text{ kJ} * \text{kg}^{-1} * \text{K}^{-1}$  pro průměrnou teplotu  $55^\circ \text{C}$  procházející chladičem. [14, 12]

## VODNÍ CHLADIČ

Na obrázku 63. je vyneseno vypočtený chladičový výkon odvedený z vodního okruhu a chladičový výkon vypočtený pro vzduch pocházející chladičem. Chladičový výkon vypočtený z průtoku vody je ve většině záznamu nižší než výkon odvedený vzduchem. Je také více závislý na otáčkách motoru a rychlosti vozu. Tyto parametry výrazně ovlivňují průtok vody a rozdíl teplot na vstupu a výstupu z chladiče.

Chladičový výkon vzduchu je vypočtený z naměřeného rozdílu teplot a očekávaného průtoku vzduchu. Rozdíl teplot je v průběhu záznamu stabilní a průtok vzduchu je vypočtený z měření v aerodynamickém tunelu. Nejsou zde zahrnuty dynamické změny rychlosti, vliv otáčení kol a úhel náběhu vzduchu do sidepodu. Měření průtoku vzduchu na voze není možné realizovat pomocí měřicí vrtule vzhledem k zástavbovým rozměrům a setrvačnosti vrtule, která by při měření měla vysokou setrvačnost a nedokázala by zachytit dynamické změny průtoku. Z tohoto omezení vychází vysoký průtok vzduchu, který by při dynamickém měření na voze nedosahoval stejných hodnot odpovídajících aerodynamickému tunelu.



Obrázek 63. Chladicí výkon v průběhu jízdy

Chladicí výkony by měli být v průběhu záznamu shodné, jelikož teplo z vodního okruhu je potřeba odvést vzduchem a malá část je odvedená do okolí záření. Průměrný chladicí výkon odvedený vodou mezi 235 a 310 s činí 6,4 kW. Chladicí výkon byl nízký vzhledem k malému zatížení motoru a nízké teplotě chladicí kapaliny. Chladicí výkon je omezen výstupní teplotou vzduchu, která nemůže být vyšší než teplota vody. Z průběhu teploty výstupního vzduchu je patrné ustálení na hodnotách odpovídajících teplotě vody. Dochází tedy k vyčerpání potenciálu vzduchu a je potřeba zvýšit průtok vzduchu.

### OLEJOVÝ CHLADIČ

Chladicí výkon olejového chladiče není možné vypočítat z naměřených hodnot vzhledem k absenci teplotních senzorů před a za výměníkem. Z naměřeného průtoku je zvolen průměrný průtok a odpovídající hodnota měrné tepelné kapacity oleje. Teplotní spád je zvolen 15 °C pro porovnání výkonů chladiče. Průměrný hmotnostní tok oleje při jízdě je 22.3 g/s. Měrná tepelná kapacita pleje je  $1,67 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Vypočtený výkon výměníku je 561 W.

Výkon je řádově nižší než výkon odvedený vodním chladičem. Malý výkon chladiče je způsoben nízkým průtokem oleje a malou tepelnou kapacitou oleje. Chlazení olejem se podílí z malé části na chlazení motoru, je ale důležité pro udržení teploty oleje, aby nedocházelo k jeho přehřívání a ztrátě požadovaných vlastností. [15]



## 4 ÚPRAVY CHLADÍČÍHO SYSTÉMU

Úprava chladíčího systému musí zlepšit chlazení při zachování stávající koncepce. Nedostatkem současného řešení je malý průtok vzduchu přes chladič a recirkulace vzduchu při menší rychlosti.

### 4.1 OPTIMALIZACE CHLADIČE

Úpravou vodního chladiče je možné dosáhnout vyššího chladíčího výkonu. Pro chladič je specifický zástavbový prostor, provedení komor a jádra chladiče. Zástavbový prostor je vždy kompromisem mezi velikostí chladiče a prostorem v sidepodu. Sklonění chladiče umožňuje osadit větší výměník do menšího sidepodu, nevýhodou je horší náběžný úhel pro proudící vzduch. Velikostí chladiče je možné výrazně zvýšit, nebo také snížit chladíčí výkon. Vzhledem ke stávající koncepci je zbytečné zvětšovat plochu chladiče. Je potřeba se zaměřit na jeho optimalizaci.

Vhodným návrhem komor je dosaženo lepšího proudění z komor do jádra chladiče. Zlepšením proudění je dosaženo nižší tlakové ztráty, která je důležitá pro zvýšení průtoku chladíčí kapaliny. Vhodným použitím výpočetního programu je možné komory více optimalizovat a dosáhnout menší tlakové ztráty oproti chladiči Dragona 9.

### 4.2 OPTIMALIZACE PROUDĚNÍ PŘES CHLADIČ

Průtok vzduchu přes chladič je možné výrazně optimalizovat. Přidáním naváděče vzduchu před chladič je zabráněno recirkulaci vzduchu kolem chladiče a při vyšších rychlostech je zvýšený průtok přes chladič oproti variantě na Dragonovi 8. Naváděč byl již testován a naměřené hodnoty prokazují jeho funkčnost. Na obrázku 64. je zobrazen naváděč na Dragonovi 9. Společně s optimalizací chladiče je možné výrazně zvýšit průtok vzduchu a tím chladíčí výkon.

Optimalizací hustoty voštiny v jádře chladiče může být dosaženo menší tlakové ztráty a tím vyššího průtoku vzduchu přes chladič. Dále je touto úpravou snížena hmotnost celého chladiče. Snižování hustoty voštiny má své hranice. Teplosměnná plocha chladiče může být příliš malá a nedokáže přenést požadovaný výkon. Tento limit se projeví malou změnou chladíčího výkonu na zvyšování toku vzduchu.



Obrázek 64. Naváděč vzduchu na Dragonovi 9





Pro přívod vzduchu je rozhodující poloha a tvar aerodynamických prvků před vstupem do sidepodu. Přední křídlo se stará o distribuci proudu vzduchu kolem celého vozu. Určuje proudění vstupující do sidepodu a povahu proudu vzduchu. Vhodná konstrukce předního křídla a navedení vzduchu do vstupu sidepodu je zásadní podmínkou pro dobré chlazení. Nastavitelnými elementy před vstupem do sidepodu je možné upravit množství vzduchu proudícího do sidepodu a tím pomoci chlazení. Při optimalizaci proudění sidepodem a přes chladič je potřeba uvažovat i prvky umístěné před vstupem do sidepodu a jejich tvarování.

### 4.3 VENTILÁTOR

Ventilátor je životně důležitý pro chlazení motoru. Při nízkých rychlostech, ve kterých je vozidlo provozováno, zajišťuje dostatečný průtok vzduchu a tím umožňuje provoz v nízkých rychlostech s vysokým zatížením motoru. Na ventilátoru SPAL je možné upravit vrtuli pro zvýšení průtoku vzduchu vhodnými výpočtovými metodami, nebo nahradit SPAL jiným ventilátorem. Náhrada je možná například bezkartáčovými střídavými motory. Motory jsou podstatně lehčí, než ventilátor SPAL a umožňují plynulé řízení rychlosti. Problémem je nutný návrh vlastní vrtule a volba vhodného motoru s KV parametrem odpovídajícím navržené vrtuli.



## ZÁVĚR

Práci je možné rozdělit na dvě hlavní části. První část práce se věnuje popisu chladicího systému Dragona 8. Jsou popsány jednotlivé části chladicího systému a mazacího systému. Mazací systém je popsán také, jelikož se podílí na chlazení motoru. Je provedena analýza jízdních dat z Dragona 7 a 8. Z analýzy vyplývají problémy s chlazením vozu Dragon 8.

Na základě analýzy jízdních dat jsou provedeny ve druhé části práce měření jednotlivých částí systému. Měřeny jsou charakteristiky vodního a olejového čerpadla. Druhým měřením je měření ve větrném tunelu zaměřené na proudění vzduchu přes vodní chladič. Chladiče z Dragona 7 a 9 byly změřeny v laboratoři Hanon Systems a jejich charakteristiky vyhodnoceny. Posledním měřením je měření na voze. Z měření je patrný malý průtok vzduchu přes chladič a recirkulace vzduchu přes chladič.

Vzhledem ke zjištěným problémům jsou navrženy konstrukční změny na chladiči a aerodynamických prvcích před chladičem. Navržené konstrukční změny je potřeba otestovat na voze, nebo opakovat měření v aerodynamickém tunelu pro ověření konstrukčních změn na voze.

Z práce je patrné, že nejslabším místem chladicího systému je nízký průtok vzduchu sidepodem. Což je patrné z měření na vozidle Dragon 8, kde byl nízký rozdíl teplot na vstupu a výstupu z výměníku a naopak chladicí vzduch za výměníkem měl teplotu velmi blízkou teplotě chladicí kapaliny. Pro návrh dalších generací vozu Dragon bude třeba zaměřit pozornost při návrhu aerodynamického balení nejen na co nejvyšší přitlak, ale i na dostatečný přívod chladicího vzduchu.

U monopostu Dragon 9 mají přívod vzduchu k chladiči zlepšit křídélka na bocích monokoku, vzhledem k rané fázi testování vozu nebylo bohužel možné do termínu odevzdání práce zhodnotit jejich přínos.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Formula Student Germany All FSAE Teams. Formula Student Germany [online]. 2019 [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.de/fsc/>.
- [2] Tým TU Brno Racing. [Http://www.tubrnoracing.cz/cs/tym/o-nas/](http://www.tubrnoracing.cz/cs/tym/o-nas/) [online]. Brno: MakeArt.cz, 2014 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <http://www.tubrnoracing.cz/cs/tym/o-nas/>
- [3] SmugMug, Inc. Friday - [gallery.fsczech.cz](http://gallery.fsczech.cz) [online]. 2019, 2019 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://fsczech.smugmug.com/Photo/2018/Friday/>
- [4] FSAE History. FSAE History [online]. 2018, 2018 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.fsaonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [5] Ventilátory Spal [online]. Červený Kostelec: Unigena, 2016 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://www.spal.cz/o-225/22-ventilator-spal-va07-ap7c-31a.html>
- [6] Rauscher, J. Vozidlové motory. Studijní opory. VUT FSI Brno, 2004
- [7] Adel Wiggins: Products [online]. AdelWiggins, 2012 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://www.adelwiggins.com/index-3.html>
- [8] Axial turbine flowmeter for liquids [online]. ALMEMO® [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: [https://www.ahlborn.com/en\\_UK/products/axial-turbine-flowmeter-for-liquids](https://www.ahlborn.com/en_UK/products/axial-turbine-flowmeter-for-liquids)
- [9] OMEGA L2 - Cosworth [online]. Cosworth, 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.cosworth.com/products/omega-l2/>
- [10] Měření teploty. Vscht [online]. 2001 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [11] Voltage Divider Calculator [online]. Circuit Digest, 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/calculators/voltage-divider-calculator>
- [12] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [13] Závislost hustoty destilované vody na teplotě [online]. Jiří Bureš, 2002 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>
- [14] Tepelné vlastnosti vody při tlaku nasycení [online]. Topinfo, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/7-tepelne-vlastnosti-vody-pri-tlaku-nasyceni>
- [15] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c	[J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita
CAN-BUS	-	Datová sběrnice
E85	-	Směs 85 % etanolu a 15 % benzínu
FSG	-	Formula Student Germany
KV	[kmin*V]	Parametr motoru určující otáčky odpovídající vstupnímu napětí
$\dot{m}$	[kg/s]	Hmotnostní tok
$\dot{m}$	[kg/s]	Hmotnostní tok
m_o	[g*s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní tok oleje
m_w	[kg*s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní tok vody
NTC	-	Negativní teplotní koeficient
$\dot{V}$	[l/s]	Objemový tok
P	[W]	Chladicí výkon
p_1	mbar	Tlak vody na vstupu do motoru při měření charakteristik vodního čerpadla
p_2	mbar	Tlak vody na výstupu z motoru při měření charakteristik vodního čerpadla
p_3	mbar	Tlak vody za škrtícím ventilem při měření charakteristik vodního čerpadla
p_o_1	[bar]	Tlak oleje na vstupu do chladiče
p_o_2	[bar]	Tlak oleje na výstupu z chladiče
PTC	-	Pozitivní teplotní koeficient
PWM	-	Pulzně šířková modulace signálu
R1	[Ω]	Přídavný odpor
R2	[Ω]	Odpor termistoru
SAE	-	Society of Automotive Engineers
T_w_10	[°C]	Teplota vody na vstupu do chladiče



$T_{w\_11}$	[°C]	Teplota vody ve vstupní komoře první
$T_{w\_12}$	[°C]	Teplota vody ve vstupní komoře druhá
$T_{w\_13}$	[°C]	Teplota vody ve vstupní komoře třetí
$T_{w\_14}$	[°C]	Teplota vody ve vstupní komoře čtvrtá
$T_{w\_20}$	[°C]	Teplota vody na výstupu z chladiče
$T_{w\_21}$	[°C]	Teplota vody ve výstupní komoře první
$T_{w\_22}$	[°C]	Teplota vody ve výstupní komoře druhá
$T_{w\_23}$	[°C]	Teplota vody ve výstupní komoře třetí
$T_{w\_24}$	[°C]	Teplota vody ve výstupní komoře čtvrtá
$T_{w\_30}$	[°C]	Teplota vstupního vzduchu do chladiče
$T_{w\_40}$	[°C]	Teplota výstupního vzduchu z vodního chladiče
$V_{in}$	[V]	Vstupní napětí
$V_{out}$	[V]	Výstupní napětí
$\Delta T$	[°C]	Rozdíl teplot